Editor
Hamidin Rasulu
Waode Munaeni

Manajemen Rekayasa Lingkungan

**Ranno Marlany Rachman, Badrun Ahmad,
Miska Sanda Lembang, Benny Hidayat, Nur Ikhsan,
Abdul Rahim Sya'ban, Katarina Hesty Rombe,
La Ode Muhammad Rauda Agus Udaya Manarfa, Rini Sriyani, Asrim**

MANAJEMEN REKAYASA LINGKUNGAN

Penulis
Ranno Marlany Rachman
Badrun Ahmad
Miska Sanda Lembang
Benny Hidayat
Nur Ikhsan
Abdul Rahim Sya'ban
Katarina Hesty Rombe
La Ode Muhammad Rauda Agus Udaya Manarfa
Rini Sriyani
Asrim

Editor
Hamidin Rasulu
Waode Munaeni

PENERBIT
PT. KAMIYA JAYA AQUATIC

MANAJEMEN REKAYASA LINGKUNGAN

Penulis : Ranno Marlany Rachman, Badrun Ahmad, Miska Sanda Lembang, Benny Hidayat, Nur Ikhsan, Abdul Rahim Sya'ban, Katarina Hesty Rombe, La Ode Muhammad Rauda Agus Udaya Manarfa, Rini Sriyani, Asrim

Editor : Hamidin Rasulu, Waode Munaeni

ISBN : 978-623-10-0778-0 (PDF)

Desain Sampul dan Tata Letak : Muhammad Subhan Hamka

Penerbit :
PT. Kamiya Jaya Aquatic

Anggota IKAPI No. 001/MALUKUUTARA/2024

Redaksi :
RT 008 RW 003 Kelurahan Fitu, Kecamatan Ternate Selatan,
Kota Ternate, Maluku Utara
Telp. : 0812-2279-3284
Email : kamiyajayaaquatic@gmail.com
Website : https://kjaquatic.com/

Distributor :
PT. Kamiya Jaya Aquatic

Cetakan Pertama : Mei 2024

Hak Cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun dan dengan cara apapun, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya tanpa seizin tertulis dari penerbit.

PRAKATA

Selamat datang dalam perjalanan intelektual yang menggugah hati dan pikiran ini. Buku "Manajemen Rekayasa Lingkungan" adalah hasil dari kolaborasi para ahli dan praktisi yang memiliki dedikasi yang tinggi dalam memperjuangkan keberlanjutan lingkungan. Dalam buku ini, pembaca akan diajak untuk menjelajahi berbagai konsep, teknologi, dan inovasi yang menjadi fondasi dari disiplin manajemen rekayasa lingkungan. Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi dan dampak yang semakin dirasakan dari perubahan lingkungan, pemahaman akan manajemen rekayasa lingkungan menjadi semakin penting. Melalui penelitian mendalam dan pengalaman praktis, buku ini menyoroti konsep dasar dalam manajemen rekayasa, memperkenalkan pembaca pada teknologi dan inovasi terbaru yang menjadi kunci dalam menjaga keberlanjutan lingkungan.

Bab-bab yang membahas toksikologi lingkungan perairan, manajemen polusi udara, pencemaran tanah, dan konservasi sumber daya alam memberikan pemahaman yang mendalam tentang tantangan nyata yang dihadapi dalam menjaga kelestarian ekosistem. Selain itu, pembahasan tentang manajemen rekayasa untuk mitigasi bencana alam memberikan wawasan tentang pentingnya respons yang cepat dan efektif dalam menghadapi ancaman lingkungan yang mendesak. Tantangan perubahan iklim tidak bisa diabaikan, dan buku ini mengeksplorasi peran kritis rekayasa lingkungan dalam menanggapi perubahan iklim global. Dalam konteks ini, konsep dan praktik manajemen energi terbarukan menjadi sorotan penting, menawarkan solusi yang berkelanjutan untuk menangani krisis energi dan dampak lingkungan yang terkait. Namun, di balik semua teknologi dan strategi manajemen, buku ini juga menghadirkan perspektif etika dan sosial yang tidak boleh dilupakan. Pentingnya membangun kesadaran akan dampak sosial dari setiap keputusan dan tindakan dalam rekayasa lingkungan menjadi tema yang melintasi semua bab.

Terakhir, melalui serangkaian studi kasus yang menarik, pembaca akan disajikan dengan contoh konkret tentang implementasi praktis dari konsep-konsep yang dibahas dalam buku ini. Studi kasus ini memberikan

inspirasi dan pembelajaran berharga bagi pembaca untuk menerapkan prinsip-prinsip manajemen rekayasa lingkungan dalam konteks yang nyata.

Kami berharap bahwa buku ini tidak hanya menjadi sumber pengetahuan yang berharga tetapi juga menjadi pijakan untuk tindakan nyata dalam menjaga kelestarian lingkungan bagi generasi mendatang. Semoga buku ini memberikan wawasan yang mendalam dan memicu perubahan positif dalam upaya kita untuk menciptakan dunia yang lebih hijau dan berkelanjutan. Terima kasih atas minat dan dukungan Anda dalam perjalanan ini.

Salam,

Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA iii
DAFTAR ISI v
DAFTAR TABEL viii
DAFTAR GAMBAR ix

Bab 1. KONSEP DASAR MANAJEMEN REKAYASA LINGKUNGAN
1.1 Pengantar Manajemen Rekayasa Lingkungan 1
1.2 Prinsip dan Fungsi Manajemen Rekayasa Lingkungan 3
1.3 Kerangka Kerja Manajemen Lingkungan 5
1.4 Prinsip-prinsip Dasar Rekayasa Lingkungan 7
1.5 Hukum dan Kebijakan Lingkungan 9
1.6 Teknologi Rekayasa Lingkungan 11
1.7 Manajemen Sumber Daya Alam 18
1.8 Analisis Dampak Lingkungan 20
1.9 Evaluasi dan Persetujuan AMDAL (Salim, 2022) 21
1.10 Monitoring dan Audit 23
1.11 Manajemen Risiko Lingkungan 25
1.12 Pemantauan dan Evaluasi Lingkungan 25
1.13 Penutup 28

Bab 2. TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM REKAYASA LINGKUNGAN
2.1 Teknologi Hijau dalam Rekayasa Lingkungan 30
2.2 Inovasi Terkini dalam Rekayasa Lingkungan 32

Bab 3. TOKSIKOLOGI LINGKUNGAN PERAIRAN
3.1 Sumber, Mekanisme, dan Jenis Pencemaran Zat Toksik Perairan 45
3.2 Dampak Zat Toksik di Lingkungan Perairan 54
3.3 Uji Toksisitas 59

Bab 4. MANAJEMEN POLUSI UDARA DAN PENCEMARAN TANAH
4.1 Paparan Polusi Udara 64

4.2 Materi pencemar Udara 67
4.3 Pengendalian Pencemaran Udara 69
4.4 ISO 14001 Tahun 2015: Standar Manajemen Lingkungan 70
4.5 Kebijakan mengurangi polusi udara 71
4.6 Pencemaran Tanah 74
4.7 Penyebab dan jenis pencemaran tanah 76
4.8 Remediasi Tanah terkontaminasi 78

Bab 5. MANAJEMEN KONSERVASI SUMBER DAYA ALAM
5.1 Strategi dalam Konservasi Hutan 84
5.2 Strategi Konservasi Sumber Daya Air 94

Bab 6. MANAJEMEN REKAYASA UNTUK MITIGASI BENCANA ALAM
6.1 Strategi dan Teknik dalam Pengendalian Banjir 97
6.2 Manajemen Risiko Gempa Bumi 104

Bab 7. PERUBAHAN IKLIM DAN REKAYASA LINGKUNGAN
7.1 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Lingkungan 109

Bab 8. MANAJEMEN ENERGI TERBARUKAN
8.1 Pendahuluan 122
8.2 Pengertian Dan Jenis Energi Terbarukan 126
8.3 Prinsip dan Teknologi Memanfaatan Energi Terbarukan 129
8.4 Aspek Perencanaan Dan Pengembangan Energi Terbarukan 132
8.5 Integrasi dan Pengelolaan Sistem Energi Terbarukan 134
8.6 Dampak Lingkungan Dan Sosial Ekonomi Dari Pemanfaatan Energi Terbarukan 137
8.7 Kesimpulan Dan Pandangan Kedepan 140

Bab 9. ETIKA DAN SOSIAL DALAM REKAYASA LINGKUNGAN
9.1 Pengantar Etika dalam Rekayasa Lingkungan 142
9.2 Prinsip Etika dan Tanggung Jawab Sosial 148
9.3 Etika Aplikatif dalam Proyek Lingkungan 156
9.4 Interaksi dengan Masyarakat dan Stakeholder 158
9.5 Masa Depan Etika dalam Rekayasa Lingkungan 160

Bab 10. STUDI KASUS MANAJEMEN REKAYASA LINGKUNGAN
10.1 Analisis Studi Kasus Sukses 168
10.2 Pelajaran dari Studi Kasus.....182

DAFTAR PUSTAKA 184
BIODATA PENULIS.....218

DAFTAR TABEL

4.1 Baku Mutu Udara Ambien Nasional 66
4.2 Daftar logam berat dan ambang batas lingkungannya..... 75
4.3 Peranan mikroba tanah pada rehabilitasi laha bekas tambang 80
10.1 Dimensi Kolam Pengendapan..... 172
10.2 Detention Time Kolam Pengendapan 172

DAFTAR GAMBAR

1.1 Diagram sederhana dari proses biofilter 12
1.2 Nano teknologi..... 12
1.3 Operasi distilasi membran dengan konfigurasi celah udara 13
1.4 Teknik Bioremediasi..... 13
1.5 Teknologi Fitoremediasi 14
1.6 Mekanisme dan tahapan pirolisis dan gasifikasi..... 14
1.7 Sistem tenaga surya..... 15
1.8 Milestone perkembangan teknologi pemanfaatan energi angin dengan revolusi produktivitas..... 15
1.9 Aplikasi dan keunggulan sumber bioenergi seperti biochar, bio-oil, dan syngas yang diperoleh dari perlakuan termal bahan biomassa 16
1.10 Teknologi komposit material dalam konstruksi 17
1.11 Sistem pemantauan lingkungan cerdas (SEM) menyoroti kontaminasi air dan pemantauannya menggunakan cloud yang menghubungkan internet of things (IoT) dan sensor..... 18
3.1 Sumber pencemaran, (kiri) langsung; (kanan) tidak langsung..... 48
3.2 Alur pencemaran zat toksik 51
3.3 Reaksi hemoglobin menjadi methemoglobin..... 56
3.4 Blooming Algae 58
3.5 Uji Toksisitas, (kiri) akut; (kanan) kronis..... 61
4.1 Polusi udara Jakarta 63
4.2 Penyakit akibat terpapar polusi udara..... 65
4.3 Design Alat Bioventing sederhana 78
4.4 Proses kerja Biostimulasi 79
4.5 Proses kerja Bioaugmentasi..... 79
4.6 Permodelan Fitoremediasi..... 81
4.7 Proses kerja Biopiles..... 82
4.8 Proses kerja bioreactor dalam meremediasi tanah tercemar..... 83
5.1 Hutan Hujan Tropis di Kalimantan..... 85
5.2 Penggundulan Hutan di Kalimantan 87
5.3 Kegiatan Rehabilitasi Hutan di Kupang..... 89
5.4 Irigasi Pertanian di Cirebon 91
5.5 Polusi Sungai di Jakarta..... 93

5.6 Aksi Peduli Lingkungan Perairan di Tambak Wedi Surabaya 95
6.1 Siklus bencana dan Sistem Penanggulangannya 99
7.1 Dampak pemanasan laut, pengasaman dan de-oksigenasi pada tingkat individu dan populasi 110
7.2 Pengamatan satelit terhadap anomali suhu permukaan laut selama lima tahun terakhir (2015−2019) dengan mengacu pada data lima tahun pertama (1982−1986) 111
7.3 Proses pengasaman laut.....114
7.4 Dampak asidifikasi laut pada ikan.....123
7.5 Pemutihan pada karang.....115
7.6 Daerah dengan kecepatan angin tinggi di Nigeria 117
7.7 Struktur bagian dalam turbin angin 118
7.8 Konversi biomassa untuk pembangkit energi.....119
7.9 Proses gasifikasi 120
7.10 Proses pirolisis.....120
7.11 Pencernaan anaerobik 121
10.1 Air pada Sump Pit 1 PT Rimau Energy Mining 169
10.2 Pompa pada Pit 1 PT Rimau Energy Mining.....170
10.3 Kolam pengendapan pada Pit 1 PT Rimau Energy Mining..... 171
10.4 Kolam pengadukan pada PT Rimau Energy Mining 173
10.5 Perubahan warna air 174
10.6 Grafik percobaan menggunakan variable tawas.....174
10.7 Grafik percobaan menggunakan variable kapur 175
10.8 Struktur internal dari model enkapsulasi 176
10.9 Peta Sub DAS Aek Silang.....177
10.10 Penampang Hiposenter Barat – Timur Area Panas Bumi.....181

Bab 1

KONSEP DASAR MANAJEMEN REKAYASA LINGKUNGAN

1.1 Pengantar Manajemen Rekayasa Lingkungan

Manajemen Rekayasa Lingkungan adalah sebuah disiplin ilmu dan praktik yang menggabungkan prinsip-prinsip rekayasa, manajemen, dan ilmu lingkungan untuk mengembangkan solusi terhadap masalah lingkungan (Fortuna dkk., 2012). Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa kegiatan pembangunan dan industri berlangsung dengan cara yang berkelanjutan, meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, dan memperbaiki kondisi lingkungan yang sudah rusak. Berikut adalah penjelasan lebih detail dan lengkap mengenai pengantar Manajemen Rekayasa Lingkungan:

1.1.1 Konsep Dasar

- Sustainability (Keberlanjutan): Manajemen Rekayasa Lingkungan menekankan pentingnya pembangunan berkelanjutan, yaitu pembangunan yang memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengurangi kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka (Tomislav, 2018).
- Ekosistem dan Biodiversitas: Memahami fungsi ekosistem dan pentingnya keanekaragaman hayati dalam menjaga keseimbangan lingkungan (Schulze & Mooney, 1994).
- Pengurangan Dampak Lingkungan: Strategi dan teknologi untuk mengurangi pencemaran, mengelola limbah, dan

mengurangi penggunaan sumber daya alam yang tidak terbarukan (Huesemann, 2003).

1.1.2 Bidang Kajian

- Pengelolaan Air: Termasuk pengelolaan sumber daya air, pengolahan air limbah, dan pengendalian banjir (Loucks dkk., 2017).
- Pengelolaan Limbah: Strategi untuk mengelola limbah padat dan berbahaya, termasuk daur ulang dan pembuangan yang aman (Kanagamani dkk., 2020).
- Pengendalian Polusi: Teknik untuk mengurangi emisi polutan ke udara, air, dan tanah (Cooper & Alley, 2010).
- Rehabilitasi Lahan: Upaya untuk memulihkan lahan yang telah rusak atau terkontaminasi (Brown & Lugo, 1994).
- Energi Terbarukan dan Efisiensi Energi: Penerapan sumber energi yang ramah lingkungan dan strategi untuk mengurangi konsumsi energi (Riti & Shu, 2016).

1.1.3 Prinsip Manajemen

- Penilaian Risiko dan Dampak Lingkungan: Analisis potensi dampak kegiatan pembangunan terhadap lingkungan dan strategi untuk mengurangi risiko tersebut (Jones, 2001).
- Perencanaan dan Desain Berkelanjutan: Integrasi pertimbangan lingkungan dalam perencanaan dan desain proyek untuk mengoptimalkan kinerja lingkungan (Handfield dkk., 2001).
- Hukum dan Kebijakan Lingkungan: Pemahaman tentang peraturan lingkungan dan bagaimana mereka mempengaruhi manajemen proyek (Coglianese & Nash, 2001).
- Partisipasi Masyarakat: Melibatkan masyarakat setempat dalam proses pengambilan keputusan dan upaya konservasi lingkungan (Reed, 2008).

1.1.4 Peran Rekayasa Lingkungan

- Inovasi Teknologi: Pengembangan dan penerapan teknologi baru untuk menangani masalah lingkungan (Mihelcic & Zimmerman, 2021).
- Pemantauan dan Evaluasi: Melakukan pemantauan lingkungan secara berkelanjutan dan mengevaluasi efektivitas strategi manajemen (Kihuha, 2018).
- Konsultasi dan Advokasi: Memberikan saran ahli kepada pemerintah, industri, dan organisasi non-profit tentang cara terbaik untuk mengelola masalah lingkungan (Owen, 2021).

Manajemen Rekayasa Lingkungan adalah bidang yang sangat penting dan relevan di era sekarang, di mana tekanan terhadap lingkungan terus meningkat akibat aktivitas manusia. Melalui pendekatan multidisipliner, manajemen rekayasa lingkungan berusaha untuk menemukan keseimbangan antara pembangunan dan pelestarian lingkungan, memastikan bahwa kita dapat memenuhi kebutuhan kita saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka**.**

1.2. Prinsip dan Fungsi Manajemen Rekayasa Lingkungan

Manajemen rekayasa lingkungan berfokus pada pengembangan, implementasi, dan pemantauan strategi dan praktik untuk melindungi dan memperbaiki lingkungan (Jain dkk., 2012). Berikut adalah prinsip utamanya (Mines, 2014):

1. Pencegahan Polusi: Mengutamakan pencegahan polusi daripada penanganan atau pemulihan setelah terjadinya kontaminasi. Ini melibatkan optimasi proses untuk mengurangi emisi dan limbah.
2. Penggunaan Sumber Daya yang Efisien: Mengoptimalkan penggunaan sumber daya alam, termasuk air, energi, dan bahan baku, untuk meminimalkan dampak lingkungan.
3. Pengelolaan Siklus Hidup: Memperhitungkan dampak lingkungan dari produk atau proyek sepanjang siklus

hidupnya, dari pengadaan bahan baku hingga pembuangan akhir.

4. Keterlibatan Stakeholder: Melibatkan semua pihak yang berkepentingan, termasuk karyawan, pelanggan, dan masyarakat, dalam upaya peningkatan lingkungan.
5. Perbaikan Berkelanjutan: Menerapkan pendekatan sistematis untuk secara terus-menerus mengevaluasi dan meningkatkan kinerja lingkungan.
6. Kepatuhan Regulasi: Memastikan bahwa semua operasi dan proses memenuhi atau melampaui peraturan lingkungan yang berlaku.

1.2.1 Fungsi utama manajemen rekayasa lingkungan mencakup (Weiner & Matthews, 2003):

1. Perencanaan: Mengembangkan strategi dan rencana tindakan untuk mencapai tujuan lingkungan, termasuk identifikasi aspek dan dampak lingkungan, penetapan target, dan pemilihan teknologi atau praktik yang tepat.
2. Pengorganisasian: Menyusun sumber daya (manusia, teknologi, keuangan) dan proses yang diperlukan untuk melaksanakan rencana lingkungan secara efektif.
3. Pengarahan: Memotivasi dan mengarahkan individu atau tim untuk melaksanakan tugas dan kegiatan lingkungan, termasuk pelatihan dan pengembangan kompetensi.
4. Kontrol dan Monitoring: Mengawasi pelaksanaan kegiatan lingkungan, termasuk pengumpulan dan analisis data, untuk memastikan kepatuhan terhadap standar dan pencapaian target. Melakukan audit dan evaluasi kinerja lingkungan secara berkala.
5. Komunikasi: Menyampaikan informasi relevan tentang manajemen lingkungan kepada semua pihak yang berkepentingan, baik internal maupun eksternal, dan mempromosikan kesadaran lingkungan.

6. Inovasi: Mendorong pengembangan dan adopsi teknologi baru atau praktik terbaik yang dapat meningkatkan kinerja lingkungan.

Manajemen rekayasa lingkungan memainkan peran kunci dalam memastikan bahwa organisasi tidak hanya memenuhi tanggung jawab lingkungan mereka tetapi juga meningkatkan efisiensi operasional dan keberlanjutan jangka panjang. Implementasi prinsip dan fungsi ini membutuhkan komitmen dari semua tingkatan organisasi dan kerjasama yang erat dengan pihak eksternal.

1.3. Kerangka Kerja Manajemen Lingkungan

Kerangka kerja manajemen lingkungan merupakan serangkaian prinsip, kebijakan, dan prosedur yang dirancang untuk memastikan bahwa suatu organisasi atau proyek dapat mengelola dampak lingkungannya secara efektif dan berkelanjutan (Azapagic, 2003). Kerangka kerja ini biasanya mencakup identifikasi dan penilaian aspek lingkungan, perencanaan strategis, implementasi, monitoring, dan pengendalian, serta peninjauan dan perbaikan berkelanjutan. Berikut adalah penjelasan lebih lengkap dan detail tentang kerangka kerja tersebut (Khalili & Duecker, 2013).

1. Kebijakan Lingkungan
    - Pengembangan Kebijakan: Langkah pertama dalam kerangka kerja adalah pengembangan kebijakan lingkungan yang mencerminkan komitmen organisasi terhadap pelestarian lingkungan. Kebijakan ini harus jelas, dapat diukur, dan dapat dicapai.
    - Komunikasi Kebijakan: Kebijakan lingkungan harus dikomunikasikan kepada semua pihak terkait, termasuk karyawan, pelanggan, dan pemasok, untuk memastikan pemahaman dan dukungan mereka.
2. Perencanaan
    - Identifikasi Aspek Lingkungan: Mengidentifikasi semua aspek lingkungan yang berkaitan dengan operasi organisasi,

termasuk penggunaan energi, pengelolaan limbah, dan emisi ke udara.

- Penilaian Dampak Lingkungan: Menilai potensi dampak dari aspek-aspek tersebut terhadap lingkungan.
- Penetapan Sasaran dan Tujuan: Berdasarkan penilaian, organisasi harus menetapkan sasaran dan tujuan yang konkret untuk mengurangi dampak negatifnya terhadap lingkungan.

3. Implementasi

- Struktur dan Tanggung Jawab: Menetapkan tanggung jawab dalam organisasi untuk mencapai sasaran lingkungan.
- Pelatihan dan Kesadaran: Melakukan pelatihan dan meningkatkan kesadaran lingkungan di antara karyawan.
- Dokumentasi: Membuat dokumentasi prosedur dan kebijakan manajemen lingkungan.
- Pengendalian Operasional: Mengimplementasikan prosedur operasional yang dirancang untuk mengurangi dampak lingkungan.

4. Monitoring dan Pengendalian

- Monitoring dan Pengukuran: Rutin memonitor dan mengukur kinerja lingkungan terhadap sasaran dan tujuan yang telah ditetapkan.
- Pengendalian Non-Konformitas: Mengidentifikasi, mendokumentasikan, dan mengambil tindakan korektif terhadap insiden atau kondisi yang tidak memenuhi kebijakan dan sasaran lingkungan organisasi.

5. Peninjauan dan Perbaikan Berkelanjutan

- Audit Lingkungan: Melakukan audit internal secara berkala untuk menilai keefektifan sistem manajemen lingkungan.
- Tinjauan Manajemen: Manajemen puncak meninjau kinerja manajemen lingkungan secara berkala untuk memastikan keberlangsungan dan relevansinya.

- Perbaikan Berkelanjutan: Mengidentifikasi peluang untuk perbaikan berkelanjutan dan mengimplementasikan perubahan yang diperlukan untuk meningkatkan kinerja lingkungan secara keseluruhan.

Implementasi kerangka kerja manajemen lingkungan yang efektif memungkinkan organisasi untuk tidak hanya memenuhi tanggung jawab lingkungannya tetapi juga meningkatkan efisiensi operasional, mengurangi biaya, dan meningkatkan reputasi dan kepuasan pelanggan. Salah satu contoh standar internasional yang banyak diadopsi untuk sistem manajemen lingkungan adalah ISO 14001, yang menyediakan panduan tentang cara mengelola aspek lingkungan secara efektif

1.4. Prinsip-prinsip Dasar Rekayasa Lingkungan

1. Keberlanjutan (*Sustainability*) (Anastas & Zimmerman, 2006).
    - Definisi: Prinsip yang menekankan pentingnya memenuhi kebutuhan generasi saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhannya. Ini mencakup penggunaan sumber daya secara efisien, pengembangan teknologi ramah lingkungan, dan pemeliharaan keseimbangan ekosistem.
    - Penerapan: Mengintegrasikan energi terbarukan, meningkatkan efisiensi energi, dan menerapkan konsep ekonomi sirkular dalam pengelolaan sumber daya.
2. Pencegahan Polusi (*Pollution Prevention*) (Gutierrez & Dahab, 1998).
    - Definisi: Strategi untuk mengurangi atau menghilangkan pembuangan limbah dan emisi berbahaya ke lingkungan sebelum terjadinya. Hal ini lebih diutamakan daripada mengatasi polusi setelah sudah terjadi.
    - Penerapan: Mengadopsi proses produksi yang lebih bersih, mengurangi penggunaan bahan berbahaya, dan menerapkan teknik daur ulang serta penggunaan kembali sumber daya.

3. Pengurangan Risiko (*Risk Reduction*) (Ashley, 2009).
    - Definisi: Upaya untuk mengidentifikasi, menilai, dan mengurangi risiko terhadap manusia dan lingkungan yang timbul dari kegiatan industri atau bencana alam.
    - Penerapan: Menerapkan sistem manajemen risiko, membangun infrastruktur yang tangguh terhadap bencana, dan mengembangkan teknologi yang aman bagi lingkungan.
4. Manajemen Sumber Daya (*Resource Management*) (Theodore & Dupont, 2019).
    - Definisi: Pengelolaan sumber daya alam, seperti air, udara, mineral, dan organisme hidup, secara bertanggung jawab dan berkelanjutan untuk memastikan ketersediaannya bagi generasi masa depan.
    - Penerapan: Praktik pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan, pengelolaan limbah secara efektif, dan promosi penggunaan sumber energi terbarukan.
5. Konservasi Biodiversitas (*Biodiversity Conservation*) (Keith dkk., 2002)
    - Definisi: Upaya untuk melindungi keanekaragaman hayati dan habitatnya dari kerusakan dan kepunahan. Keanekaragaman hayati penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem dan sumber genetik.
    - Penerapan: Membuat area konservasi, melakukan reboisasi, dan mengembangkan program perlindungan spesies langka dan terancam punah.
6. Partisipasi Komunitas (*Community Participation*) (Mazzurco & Jesiek, 2017)
    - Definisi: Melibatkan masyarakat lokal dalam perencanaan, pengambilan keputusan, dan pelaksanaan proyek-proyek lingkungan. Hal ini memastikan bahwa

proyek tersebut memenuhi kebutuhan dan kepentingan mereka.

- Penerapan: Dialog dengan komunitas, pendidikan lingkungan, dan program kemitraan antara pemerintah, swasta, dan masyarakat sipil.

7. Etika dan Keadilan Lingkungan (*Ethics and Environmental Justice*) (Catalano, 2022).

- Definisi: Prinsip yang menekankan pentingnya tindakan adil dan etis dalam pengelolaan lingkungan, termasuk perlakuan yang adil terhadap semua individu dan komunitas dalam penanganan masalah lingkungan.
- Penerapan: Kebijakan yang mencegah ketidakadilan lingkungan, memastikan akses yang setara terhadap sumber daya lingkungan, dan melindungi hak-hak komunitas marginal.

1.5. Hukum dan Kebijakan Lingkungan

Analisis terhadap hukum dan kebijakan lingkungan meliputi berbagai aspek yang relevan di tingkat internasional, nasional, dan lokal (Rodrigues dkk., 2009). Setiap tingkatan ini memiliki peran penting dalam membentuk strategi manajemen lingkungan. Mari kita jelaskan secara lengkap dan detail:

1.5.1 Tingkat Internasional

- Konvensi dan Perjanjian Internasional: Ada banyak perjanjian internasional yang mempengaruhi manajemen lingkungan, seperti Perjanjian Paris tentang perubahan iklim, Konvensi Keanekaragaman Hayati, dan Konvensi Basel tentang pengendalian perpindahan lintas batas limbah berbahaya. Perjanjian ini mendorong negara-negara untuk mengurangi emisi, melindungi keanekaragaman hayati, dan mengelola limbah secara bertanggung jawab (Falkner, 2016).
- Organisasi Internasional: Organisasi seperti Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNEP) dan

Organisasi Kerjasama dan Pembangunan Ekonomi (OECD) membantu menyusun kebijakan dan standar internasional, serta memfasilitasi kerjasama antarnegara dalam pengelolaan lingkungan (Borowy, 2016).

1.5.2 Tingkat Nasional

- Undang-Undang dan Regulasi: Setiap negara memiliki rangkaian hukum dan regulasi yang mengatur pengelolaan lingkungan, seperti undang-undang pengelolaan limbah, perlindungan udara bersih, dan konservasi keanekaragaman hayati. Regulasi ini menetapkan standar dan prosedur untuk industri, pemerintah, dan individu dalam melindungi lingkungan. (Mangunjaya, 2006).
- Kebijakan dan Strategi Nasional: Pemerintah nasional juga mengembangkan kebijakan dan strategi untuk mengatasi isu lingkungan spesifik, seperti strategi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim, kebijakan energi terbarukan, dan program konservasi sumber daya alam (Legionosuko dkk., 2019).

1.5.3 Tingkat Lokal

- Peraturan Daerah: Pemerintah lokal memiliki wewenang untuk mengeluarkan peraturan yang lebih spesifik sesuai dengan kondisi lingkungan setempat, seperti pengelolaan sampah kota, pembatasan emisi kendaraan, dan perlindungan ekosistem lokal (Ulum, & Ngindana, 2017)
- Inisiatif dan Program Lokal: Inisiatif seperti program daur ulang, penghijauan kota, dan konservasi air lokal merupakan contoh bagaimana kebijakan lingkungan diterapkan di tingkat lokal untuk memenuhi kebutuhan dan tantangan spesifik komunitas (Effendi, 2023).

1.5.4 Dampak terhadap Strategi Manajemen Lingkungan (Watson dkk., 2004):

- Pemenuhan Standar: Hukum dan kebijakan lingkungan menetapkan standar yang harus dipenuhi oleh semua

pemangku kepentingan, memaksa mereka untuk mengadopsi praktik yang lebih ramah lingkungan.

- Pengembangan Teknologi dan Inovasi: Regulasi yang ketat seringkali mendorong industri untuk mengembangkan teknologi baru yang lebih efisien dan ramah lingkungan.
- Peningkatan Kesadaran: Kebijakan lingkungan yang efektif dapat meningkatkan kesadaran publik tentang isu lingkungan dan mendorong partisipasi aktif masyarakat dalam upaya perlindungan lingkungan.
- Kerjasama Antar Sektor: Hukum dan kebijakan lingkungan sering memerlukan kerjasama antara pemerintah, industri, dan masyarakat sipil, mempromosikan pendekatan terpadu dalam manajemen lingkungan.

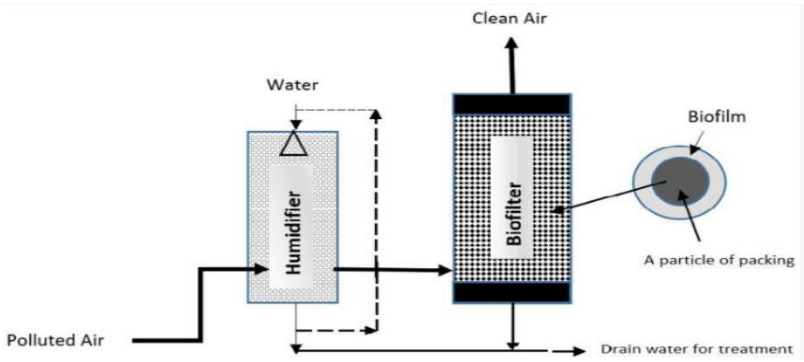
Secara keseluruhan, hukum dan kebijakan lingkungan berperan penting dalam membentuk strategi manajemen lingkungan di semua tingkatan, dari lokal hingga internasional, memastikan bahwa upaya perlindungan lingkungan dilakukan secara komprehensif dan efektif.

1.6. Teknologi Rekayasa Lingkungan

Teknologi rekayasa lingkungan terus berkembang untuk mengatasi berbagai masalah lingkungan, mulai dari pengelolaan limbah hingga pemulihan ekosistem (Sharma & Reddy, 2004). Teknologi ini tidak hanya berfokus pada mitigasi dampak negatif tetapi juga pada penerapan prinsip-prinsip keberlanjutan dan teknologi hijau. Berikut adalah beberapa teknologi terkini dalam rekayasa lingkungan:

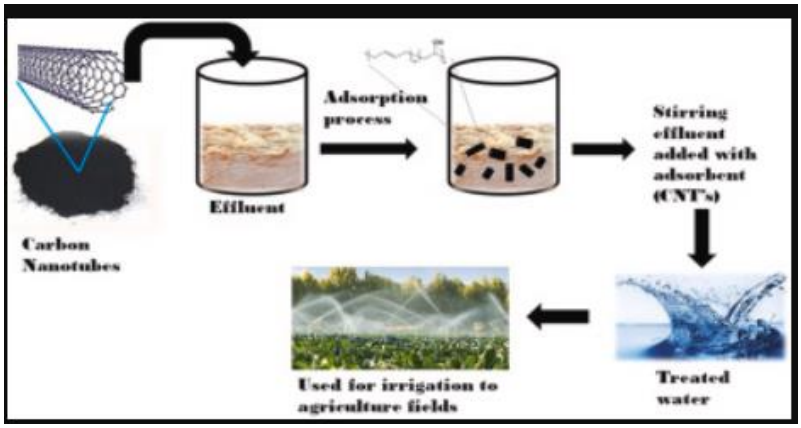
1. Teknologi Pengolahan Air dan Limbah

- Biofiltrasi: Teknologi ini menggunakan mikroorganisme dan tanaman untuk menghilangkan kontaminan dari air limbah sebelum dibuang ke lingkungan (Srivastava & Majumder, 2008) (**Gambar 1.1)**.



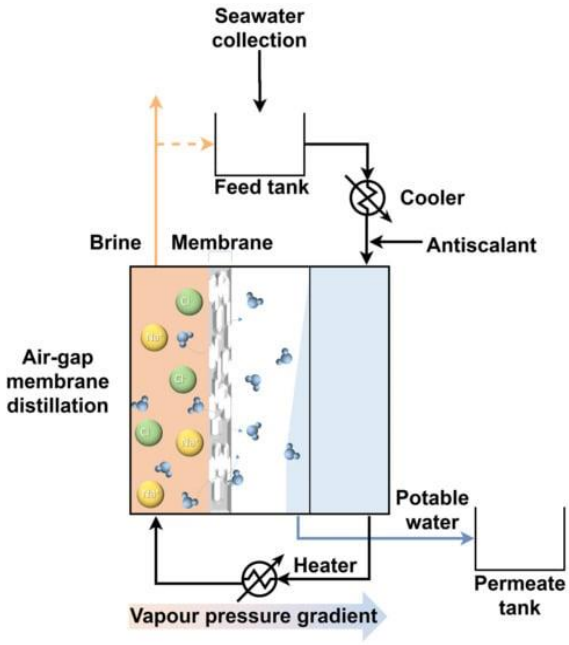
Gambar 1.1. Diagram sederhana dari proses biofilter (Shareefdeen, 2022).

- Nanoteknologi dalam Pengolahan Air: Nanopartikel digunakan untuk menghilangkan polutan dari air, termasuk logam berat dan mikroorganisme, dengan efisiensi tinggi (Ibrahim dkk., 2016) (**Gambar 1.2)**.



Gambar 1.2. Nano teknologi (Manikandan dkk., 2022).

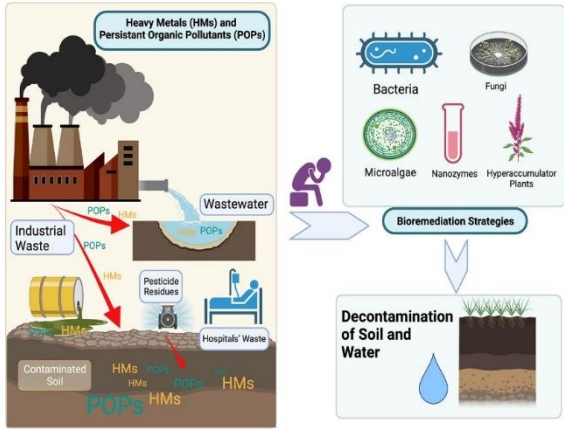
- Desalinasi: Penggunaan teknologi membran, seperti osmosis terbalik, untuk mengolah air laut atau air asin menjadi air tawar yang layak konsumsi (**Gambar 1.3)**.



Gambar 1.3. Operasi distilasi membran dengan konfigurasi celah udara (Skuse dkk., 2021)

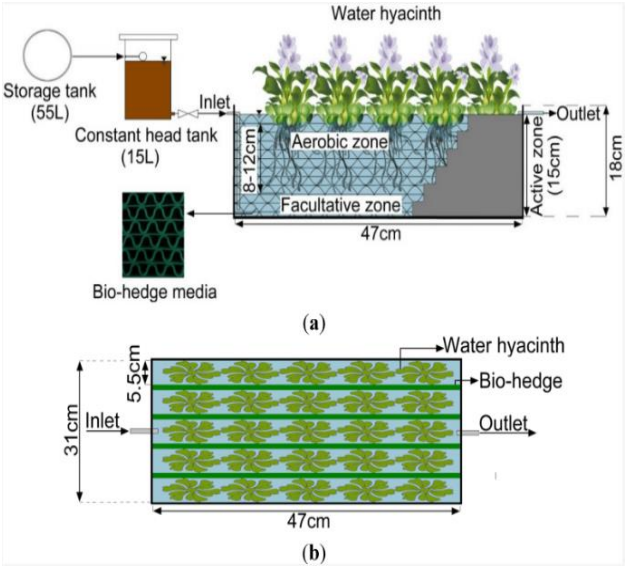
2. Pengelolaan dan Pemulihan Lingkungan

- Bioremediasi: Teknik ini memanfaatkan mikroorganisme atau tanaman untuk membersihkan tanah dan air yang terkontaminasi polutan, seperti minyak bumi dan logam berat (**Gambar 1.4)**.



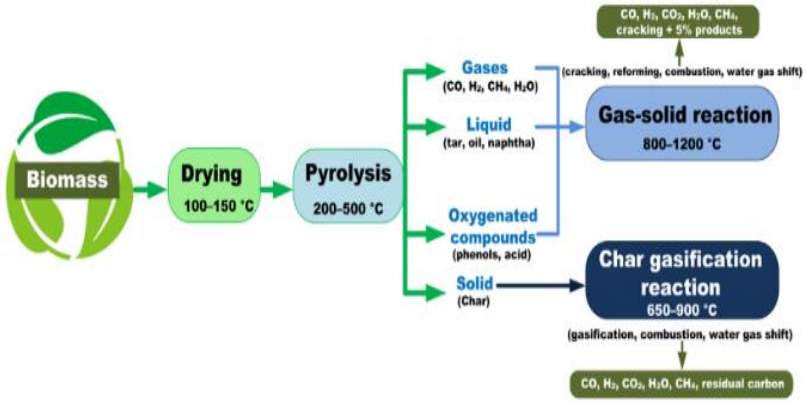
Gambar 1.4. Teknik Bioremediasi (Tufail dkk., 2022).

- Fytoremediasi: Penggunaan tanaman khusus untuk menyerap, memindahkan, atau mendegradasi kontaminan dari tanah dan air (**Gambar 1.5)**.



Gambar 1.5. Teknologi Fitoremediasi (Valipour dkk., 2015)

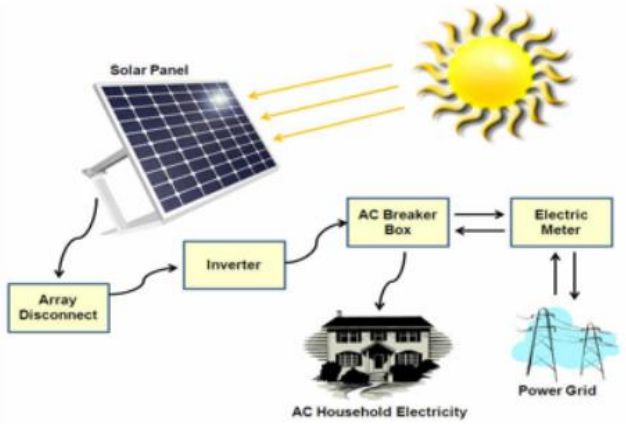
- Teknologi Pengolahan Limbah Padat: Metode seperti pirolisis, gasifikasi, dan plasma arc digunakan untuk mengolah limbah padat, mengubahnya menjadi energi atau produk yang berguna lainnya (**Gambar 1.6)**.



Gambar 1.6. Mekanisme dan tahapan pirolisis dan gasifikasi (Glushkov dkk., 2021).

3. Energi Terbarukan dan Teknologi Hijau

- Panel Surya: Teknologi fotovoltaik yang mengubah sinar matahari menjadi listrik, menjadi semakin efisien dan terjangkau (**Gambar 1.7)**.

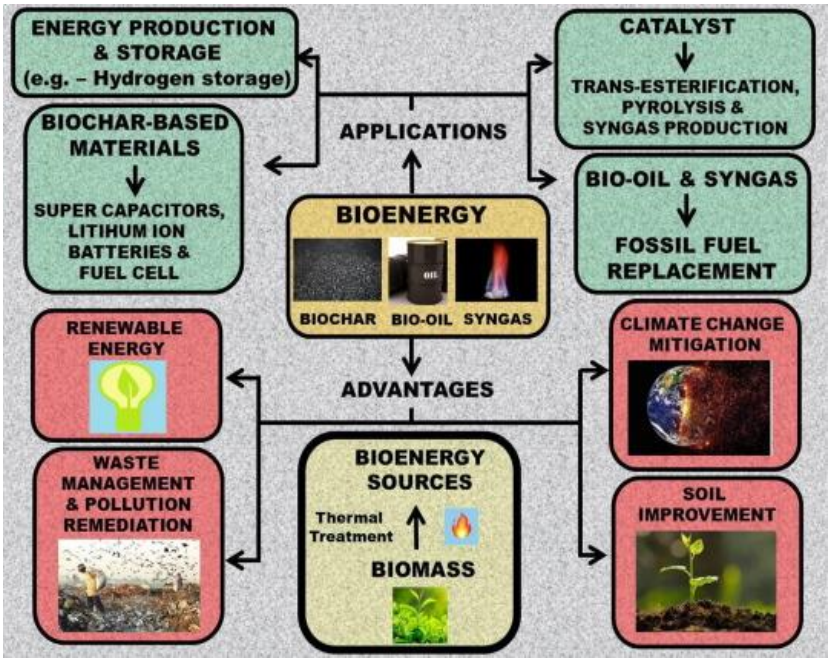


Gambar 1.7. Sistem tenaga surya (Patil dkk., 2022)

- Turbina Angin: Pengembangan desain dan material membuat turbin angin lebih efisien dalam menghasilkan energi dari angin (**Gambar 1.8)**.

Gambar 1.8. Milestone perkembangan teknologi pemanfaatan energi angin dengan revolusi produktivitas (Wang dkk., 2023).

- Biomassa dan Bioenergi: Penggunaan sisa-sisa pertanian dan limbah organik lainnya untuk menghasilkan energi, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (**Gambar 1.9)**.



Gambar 1.9. Aplikasi dan keunggulan sumber bioenergi seperti biochar, bio-oil, dan syngas yang diperoleh dari perlakuan termal bahan biomassa (Kumar dkk., 2020)

4. Teknologi Hijau dalam Konstruksi

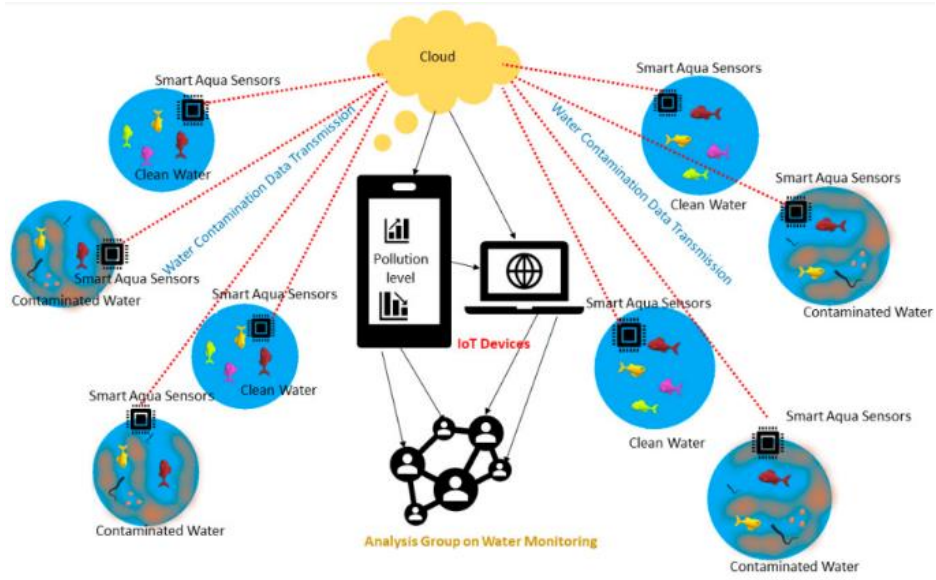
- Bangunan Hijau: Desain dan konstruksi bangunan yang meminimalkan dampak lingkungan, menggunakan material ramah lingkungan, dan mengoptimalkan penggunaan energi dan air (**Gambar 1.10)**.
- Atap Hijau dan Dinding Vertikal: Integrasi tanaman dalam desain bangunan untuk meningkatkan isolasi, mengurangi runoff air hujan, dan memperbaiki kualitas udara.

Gambar 1.10. Teknologi komposit material dalam konstruksi (Patil dkk., 2022).

5. Pengendalian Polusi dan Pemantauan Lingkungan

- Sensor Lingkungan: Teknologi sensor canggih digunakan untuk memantau kualitas udara, air, dan tanah secara real-time, memungkinkan deteksi dini polutan dan intervensi cepat (**Gambar 1.11)**.
- Teknologi Pengendalian Emisi: Sistem seperti scrubbers dan filter partikulat digunakan untuk mengurangi emisi polutan dari industri dan kendaraan.

Penerapan teknologi rekayasa lingkungan ini tidak hanya bermanfaat untuk memulihkan dan melindungi lingkungan tetapi juga mendukung transisi menuju ekonomi yang lebih berkelanjutan dan rendah karbon. Dengan inovasi yang terus berkembang, kita dapat mengharapkan solusi yang lebih efektif dan efisien dalam mengatasi tantangan lingkungan di masa depan.



Gambar 1.11. Sistem pemantauan lingkungan cerdas (SEM) menyoroti kontaminasi air dan pemantauannya menggunakan cloud yang menghubungkan internet of things (IoT) dan sensor (Ullo & Sinha, 2020).

1.7. Manajemen Sumber Daya Alam

Manajemen sumber daya alam merupakan upaya terpadu untuk mengelola sumber daya alam seperti air, udara, dan tanah dengan cara yang berkelanjutan, memastikan bahwa generasi masa kini dan masa depan dapat memanfaatkannya. Pendekatan manajemen ini melibatkan perencanaan, penggunaan, dan pemeliharaan sumber daya secara efisien, efektif, dan etis. Berikut ini adalah beberapa aspek penting dari manajemen sumber daya alam (Grimble & Wellard, 1997):

1. **Pendekatan Ekosistem**

   Pendekatan ekosistem dalam manajemen sumber daya alam menekankan pada pengelolaan dan perlindungan fungsi ekosistem secara keseluruhan. Ini termasuk pemeliharaan biodiversitas, siklus air, dan proses alami lainnya yang mendukung kehidupan. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan mempromosikan keseimbangan antara pemanfaatan sumber daya dan pemeliharaan fungsi ekosistem.

2. **Manajemen Berkelanjutan**
   Manajemen berkelanjutan sumber daya alam bertujuan untuk memenuhi kebutuhan manusia saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhannya. Ini melibatkan penggunaan sumber daya secara efisien, pengurangan pemborosan, dan penerapan teknologi yang ramah lingkungan. Strategi ini mencakup pengelolaan hutan, perikanan, air, dan lahan pertanian dengan cara yang meminimalkan degradasi lingkungan dan mendukung pemulihan sumber daya.

3. **Konservasi dan Restorasi**
   Konservasi sumber daya alam melibatkan perlindungan dan pemeliharaan sumber daya alam, termasuk habitat dan spesies yang terancam punah. Restorasi ekosistem berkaitan dengan pemulihan ekosistem yang telah rusak atau terdegradasi. Kedua strategi ini penting untuk mempertahankan keanekaragaman hayati dan fungsi ekosistem yang sehat.

4. **Pengelolaan Air**
   Manajemen sumber daya air melibatkan pengelolaan kuantitas dan kualitas air untuk memenuhi kebutuhan manusia dan ekosistem. Ini mencakup pengelolaan sumber air, seperti sungai, danau, dan akuifer, serta pengolahan air limbah. Strategi pengelolaan air yang berkelanjutan mencakup konservasi air, penggunaan kembali air, dan pengurangan polusi air.

5. **Pengelolaan Udara**
   Manajemen kualitas udara bertujuan untuk mengurangi polusi udara, yang dapat berdampak buruk terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Strategi ini melibatkan pengendalian emisi dari industri, kendaraan, dan sumber lainnya, serta pemantauan kualitas udara dan penerapan standar kualitas udara.

6. **Pengelolaan Tanah**
   Manajemen sumber daya tanah melibatkan penggunaan dan pemeliharaan tanah dengan cara yang berkelanjutan. Ini mencakup praktik seperti pertanian berkelanjutan, pengelolaan

erosi, dan reboisasi. Tujuannya adalah untuk mempertahankan kesuburan tanah dan mencegah degradasi tanah.

Dalam menerapkan strategi manajemen sumber daya alam ini, penting untuk memperhatikan aspek sosial-ekonomi masyarakat lokal dan memastikan partisipasi mereka dalam proses pengelolaan. Integrasi antara kebijakan publik, ilmu pengetahuan, dan teknologi juga kritis untuk mencapai tujuan manajemen sumber daya alam yang berkelanjutan.

1.8. Analisis Dampak Lingkungan

Analisis Dampak Lingkungan (AMDAL) adalah sebuah proses sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengevaluasi potensi dampak lingkungan yang mungkin ditimbulkan oleh sebuah proyek atau kegiatan sebelum keputusan pelaksanaannya diambil (Yakin, 2017). Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa aspek lingkungan dipertimbangkan secara menyeluruh dalam perencanaan dan pengambilan keputusan. Berikut adalah metode dan teknik yang digunakan dalam AMDAL (Sugiyanto dkk., 2022):

1. **Screening**
   Proses pertama adalah screening atau penyaringan untuk menentukan apakah suatu proyek memerlukan AMDAL yang lengkap atau tidak. Ini didasarkan pada jenis, lokasi, dan skala proyek serta potensi dampaknya terhadap lingkungan.

2. S**coping**
   Scoping adalah proses untuk menentukan lingkup dan batasan kajian AMDAL. Ini termasuk identifikasi isu-isu lingkungan kunci, penentuan metode analisis yang akan digunakan, dan pemilihan alternatif proyek. Scoping dilakukan melalui konsultasi dengan pihak-pihak terkait, termasuk masyarakat lokal dan ahli lingkungan.

3. **Pengumpulan Data**
   Pengumpulan data tentang kondisi lingkungan baseline (kondisi awal) sangat penting untuk memahami dampak yang mungkin ditimbulkan oleh proyek. Ini meliputi data fisik (misalnya, topografi, geologi), biologis (misalnya, flora dan fauna), dan

sosial-ekonomi (misalnya, kepadatan penduduk, mata pencaharian).

4. **Prediksi dan Evaluasi Dampak**
   Setelah data baseline dikumpulkan, langkah selanjutnya adalah memprediksi potensi dampak lingkungan dari proyek. Teknik yang dapat digunakan termasuk pemodelan, perbandingan dengan proyek serupa, dan analisis deskriptif. Dampak dinilai berdasarkan signifikansinya, durasi, dan reversibilitasnya.

5. **Mitigasi dan Manajemen Dampak**
   Untuk setiap dampak negatif yang signifikan, harus diidentifikasi tindakan mitigasi atau pengelolaan. Ini mungkin termasuk perubahan desain proyek, teknik konstruksi yang lebih ramah lingkungan, atau program pemantauan lingkungan.

6. **Konsultasi Publik**
   Konsultasi dengan masyarakat dan pihak terkait lainnya merupakan bagian penting dari proses AMDAL. Ini memberikan kesempatan bagi publik untuk memberikan masukan dan memastikan bahwa kekhawatiran mereka diakomodasi dalam perencanaan proyek.

7. **Penyusunan Dokumen AMDAL**
   Semua informasi dan analisis yang dikumpulkan selama proses AMDAL disusun menjadi dokumen AMDAL. Dokumen ini harus menyajikan secara jelas metodologi, temuan, rekomendasi mitigasi, dan rencana pemantauan.

1.9. Evaluasi dan Persetujuan AMDAL (Salim, 2022).

1. **Pengajuan Dokumen AMDAL**
   Setelah dokumen AMDAL lengkap disusun, dokumen tersebut diajukan kepada otoritas lingkungan yang bertanggung jawab di wilayah dimana proyek akan dilaksanakan. Otoritas ini bisa berupa badan pemerintah pusat atau daerah, tergantung pada skala dan jenis proyek.

2. **Peninjauan oleh Ahli**

   Otoritas lingkungan akan menugaskan sekelompok ahli untuk melakukan peninjauan terhadap dokumen AMDAL yang diajukan. Tim ahli ini biasanya terdiri dari pakar di berbagai bidang, seperti ekologi, sosial, kesehatan masyarakat, dan teknik, tergantung pada kompleksitas proyek. Mereka akan memeriksa apakah analisis dampak lingkungan telah dilakukan secara menyeluruh dan apakah tindakan mitigasi yang diusulkan cukup efektif.

3. **Konsultasi Publik Tambahan**

   Selain peninjauan oleh ahli, otoritas lingkungan juga dapat mengadakan sesi konsultasi publik tambahan. Ini bertujuan untuk memberikan kesempatan kepada masyarakat umum dan pemangku kepentingan lain untuk memberikan masukan atau keberatan terhadap dokumen AMDAL yang diajukan. Proses ini memastikan transparansi dan partisipasi publik dalam pengambilan keputusan terkait proyek.

4. **Penilaian Kepatuhan terhadap Peraturan Lingkungan**

   Otoritas lingkungan akan menilai dokumen AMDAL berdasarkan kepatuhan terhadap peraturan lingkungan yang berlaku. Ini termasuk peraturan tentang pengelolaan limbah, konservasi sumber daya alam, dan perlindungan ekosistem. Penilaian ini menentukan apakah proyek sesuai dengan standar lingkungan dan dapat diberikan izin lingkungan.

5. **Keputusan**

   Berdasarkan peninjauan oleh ahli, konsultasi publik, dan penilaian kepatuhan terhadap peraturan lingkungan, otoritas lingkungan akan membuat keputusan. Keputusan ini bisa berupa persetujuan dokumen AMDAL dengan atau tanpa syarat, penolakan, atau permintaan untuk revisi dokumen. Jika disetujui, proyek dapat melanjutkan ke tahap pelaksanaan dengan syarat mematuhi rencana manajemen dan pemantauan lingkungan yang telah disusun.

6. **Izin Lingkungan**

   Setelah dokumen AMDAL disetujui, proyek akan diberikan Izin Lingkungan. Izin ini merupakan dokumen hukum yang memungkinkan pelaksanaan proyek sesuai dengan kondisi dan batasan yang ditetapkan dalam AMDAL. Izin Lingkungan juga mencakup persyaratan untuk pemantauan dan pelaporan berkala terhadap kinerja lingkungan proyek.

   Proses evaluasi dan persetujuan dokumen AMDAL merupakan langkah penting untuk memastikan bahwa proyek tidak hanya memenuhi tujuan ekonomi dan sosial, tetapi juga bertanggung jawab terhadap lingkungan. Ini membantu mencegah atau meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar.

1.10. Monitoring dan Audit

Setelah proyek mendapatkan persetujuan dan mulai dilaksanakan, langkah berikutnya yang sangat penting adalah melakukan monitoring dan audit terhadap dampak lingkungan yang dihasilkan oleh proyek tersebut (Husen, 2009) Ini dilakukan untuk memastikan bahwa semua tindakan mitigasi yang telah direncanakan berjalan efektif dan untuk mengidentifikasi apakah ada dampak lingkungan yang tidak terduga.

1. **Monitoring Lingkungan**

   Monitoring lingkungan adalah proses pengamatan dan pencatatan berkelanjutan terhadap kondisi lingkungan di sekitar area proyek. Proses ini bertujuan untuk mengumpulkan data tentang dampak nyata proyek terhadap lingkungan dan efektivitas dari tindakan mitigasi yang telah dilaksanakan. Monitoring dilakukan dengan menggunakan berbagai metode dan teknologi, tergantung pada jenis dampak yang dipantau. Misalnya, untuk memantau kualitas air, digunakan alat ukur kualitas air, sedangkan untuk memantau populasi spesies tertentu, dapat digunakan teknik survei lapangan.

2. **Audit Lingkungan**

   Audit lingkungan adalah evaluasi sistematis dan terdokumentasi terhadap efektivitas manajemen lingkungan proyek. Audit ini melibatkan pemeriksaan terhadap catatan kegiatan, pengamatan langsung, dan wawancara dengan staf. Tujuan dari audit adalah untuk mengidentifikasi keberhasilan dan kelemahan dalam implementasi rencana manajemen lingkungan, serta untuk menentukan area perbaikan. Audit lingkungan biasanya dilakukan oleh auditor eksternal untuk memastikan objektivitas dan keakuratan hasil.

3. **Pendekatan Multidisiplin dan Kolaborasi**

   Proses AMDAL memerlukan pendekatan multidisiplin karena melibatkan berbagai aspek lingkungan, sosial, ekonomi, dan teknis. Pendekatan ini membutuhkan kerja sama antara ahli dari berbagai bidang, termasuk ekologi, sosial, kesehatan masyarakat, dan teknik. Kolaborasi ini penting untuk memastikan bahwa semua dampak potensial teridentifikasi dan dipertimbangkan dalam rencana manajemen lingkungan.

4. **Penyesuaian Teknik dan Metode**

   Teknik dan metode yang digunakan dalam proses AMDAL harus disesuaikan dengan karakteristik spesifik dari proyek dan lingkungan tempat proyek itu dilaksanakan. Setiap proyek memiliki tantangan dan kebutuhan yang unik, sehingga pendekatan yang digunakan dalam AMDAL harus fleksibel. Misalnya, proyek yang berlokasi di area dengan keanekaragaman hayati yang tinggi memerlukan teknik pemantauan biologis yang lebih detail dibandingkan proyek di area urban.

Monitoring dan audit merupakan komponen kritis dalam siklus hidup proyek setelah AMDAL. Proses ini tidak hanya memastikan kepatuhan terhadap rencana manajemen lingkungan tetapi juga memberikan peluang untuk pembelajaran dan perbaikan untuk proyek

masa depan. Pendekatan multidisiplin dan kolaborasi antar pemangku kepentingan, serta penyesuaian teknik dan metode, adalah kunci untuk menghasilkan AMDAL yang efektif dan implementasi proyek yang bertanggung jawab terhadap lingkungan.

1.11. Manajemen Risiko Lingkungan

Manajemen risiko lingkungan adalah proses sistematis untuk mengidentifikasi, menilai, dan mengelola risiko terhadap lingkungan yang dapat timbul dari aktivitas atau proyek tertentu (Krokhina dkk., 2018). Ini mencakup pengembangan strategi untuk mengurangi atau menghilangkan dampak negatif pada lingkungan, dengan tujuan untuk melindungi kesehatan manusia dan ekosistem. Berikut adalah langkah-langkah utama dalam proses manajemen risiko lingkungan (Tchankova, 2002).

1. **Identifikasi Risiko**
   Langkah pertama adalah mengidentifikasi semua risiko lingkungan potensial yang bisa muncul dari suatu kegiatan atau proyek. Ini bisa mencakup risiko terhadap kualitas air, udara, tanah, serta risiko terhadap keanekaragaman hayati dan kesehatan manusia. Identifikasi ini dilakukan melalui penelitian dan analisis mendalam terhadap semua aspek kegiatan atau proyek.
2. **Penilaian Risiko**
   Setelah risiko telah diidentifikasi, langkah selanjutnya adalah menilai risiko tersebut berdasarkan kemungkinan terjadinya dan tingkat keparahannya. Ini melibatkan evaluasi terhadap data historis, studi ilmiah, dan model prediksi untuk memahami seberapa besar dampak yang mungkin terjadi dan seberapa sering. Penilaian ini membantu dalam menentukan prioritas risiko yang harus diatasi.
3. **Strategi Mitigasi Risiko**
   Berdasarkan penilaian risiko, strategi mitigasi dikembangkan untuk mengelola atau mengurangi risiko terhadap lingkungan. Strategi ini bisa mencakup teknologi pengendalian polusi, praktik kerja yang lebih aman, perubahan desain proyek, atau

penggunaan material yang lebih ramah lingkungan. Tujuan dari strategi mitigasi adalah untuk mengurangi kemungkinan dan/atau dampak dari risiko lingkungan.

4. **Implementasi dan Monitoring**
   Strategi mitigasi yang telah dikembangkan kemudian diimplementasikan. Ini bisa melibatkan perubahan dalam operasional, pelatihan untuk karyawan, atau pemasangan peralatan baru. Setelah implementasi, monitoring dilakukan secara berkelanjutan untuk memastikan efektivitas dari tindakan mitigasi. Monitoring ini juga berguna untuk mengidentifikasi risiko baru yang mungkin muncul.
5. **Evaluasi dan Penyesuaian**
   Manajemen risiko lingkungan adalah proses yang berkelanjutan. Seiring waktu, evaluasi dari proses manajemen risiko dilakukan untuk menilai apakah strategi mitigasi berhasil atau apakah ada perubahan kondisi yang memerlukan penyesuaian strategi. Penyesuaian strategi dilakukan berdasarkan hasil evaluasi untuk memastikan manajemen risiko tetap efektif.

Manajemen risiko lingkungan memainkan peran penting dalam melindungi lingkungan dari dampak negatif aktivitas manusia (Xie dkk., 2013). Proses ini membutuhkan pemahaman mendalam tentang risiko lingkungan, penilaian yang akurat, dan pengembangan strategi mitigasi yang efektif. Melalui pendekatan yang sistematis dan berkelanjutan, dapat dilakukan pengelolaan risiko lingkungan yang efektif untuk mencapai pembangunan yang berkelanjutan dan bertanggung jawab terhadap lingkungan.

1.12. Pemantauan dan Evaluasi Lingkungan

Pemantauan dan evaluasi lingkungan merupakan bagian krusial dalam manajemen lingkungan, yang bertujuan untuk mengukur kinerja lingkungan, mendeteksi perubahan lingkungan, dan menilai efektivitas strategi pengelolaan lingkungan (Vos dkk., 2000). Proses ini menggunakan berbagai teknik dan alat untuk mengumpulkan data yang relevan, yang kemudian dianalisis untuk mendapatkan insight dan membuat keputusan berbasis bukti. Berikut ini adalah penjelasan

mengenai teknik dan alat pemantauan dan evaluasi, serta pentingnya feedback untuk perbaikan berkelanjutan.

1.12.1 Teknik dan Alat Pemantauan dan Evaluasi (Bours dkk., 20130:

1. Penginderaan Jauh (*Remote Sensing*): Teknologi ini memungkinkan pengumpulan data lingkungan dari jarak jauh menggunakan satelit atau pesawat. Penginderaan jauh sangat berguna untuk pemantauan perubahan penggunaan lahan, deforestasi, dan polusi.

2. Sistem Informasi Geografis (SIG): SIG adalah alat penting yang digunakan untuk mengelola, menganalisis, dan memvisualisasikan data geospasial. Dengan SIG, data dari berbagai sumber dapat diintegrasikan untuk menyediakan insight tentang kondisi lingkungan dan perubahannya.

3. Pemantauan Kualitas Air dan Udara: Menggunakan sensor dan stasiun pemantauan untuk mengukur parameter kunci seperti tingkat polusi, pH, kekeruhan untuk air, dan konsentrasi polutan tertentu di udara.

4. Bioindikator: Penggunaan organisme hidup seperti tumbuhan, hewan, atau mikroorganisme untuk menilai kesehatan lingkungan. Keberadaan atau kondisi organisme ini dapat mengindikasikan perubahan dalam lingkungan.

5. Audit Lingkungan: Evaluasi sistematis terhadap operasi dan proses suatu organisasi untuk menentukan sejauh mana kegiatan mereka memenuhi standar lingkungan yang berlaku.

1.12.2 Pentingnya *Feedback* untuk Perbaikan Berkelanjutan

Feedback merupakan elemen penting dalam siklus pemantauan dan evaluasi lingkungan (Stem dkk., 2005). Setelah data lingkungan dikumpulkan dan dianalisis, hasilnya harus dikomunikasikan kepada semua pemangku kepentingan terkait. Feedback ini memungkinkan organisasi untuk:

- Mengidentifikasi Area Perbaikan: Mengetahui aspek mana dari operasional atau strategi pengelolaan lingkungan yang perlu ditingkatkan.
- Mengadaptasi Strategi: Menyesuaikan atau merancang ulang strategi pengelolaan lingkungan berdasarkan bukti dan insight terbaru untuk mencapai efektivitas yang lebih tinggi.
- Meningkatkan Keterlibatan Stakeholder: Memberikan informasi yang transparan dan terkini kepada stakeholder meningkatkan kepercayaan dan mendukung keterlibatan aktif mereka dalam upaya pengelolaan lingkungan.
- Peningkatan Berkelanjutan: Dengan mengintegrasikan feedback ke dalam proses pengambilan keputusan, organisasi dapat memastikan bahwa praktik pengelolaan lingkungan mereka terus berkembang dan beradaptasi dengan tantangan baru.

Pemantauan dan evaluasi lingkungan adalah proses yang kompleks yang memerlukan penggunaan berbagai teknik dan alat untuk mengumpulkan dan menganalisis data. Melalui pemantauan yang efektif dan evaluasi yang sistematis, organisasi dapat memastikan bahwa strategi pengelolaan lingkungan mereka efektif dan responsif terhadap perubahan kondisi. Feedback merupakan komponen kunci dalam siklus ini, memungkinkan perbaikan berkelanjutan dan meningkatkan keberlanjutan lingkungan.

1.13. Penutup

Manajemen rekayasa lingkungan merupakan aspek krusial dalam upaya menjaga keseimbangan antara kemajuan teknologi dan pembangunan dengan keberlanjutan lingkungan. Prinsip-prinsip yang membentuk fondasi dari manajemen ini, seperti keberlanjutan, prinsip kehati-hatian, pembayar pencemar, dan manajemen terintegrasi, menunjukkan pentingnya pendekatan yang komprehensif dan proaktif dalam menghadapi isu-isu lingkungan. Melalui penerapan prinsip-prinsip ini, kita dapat mengarahkan penggunaan teknologi dan sumber daya secara bijaksana untuk mencegah kerusakan lingkungan,

memperbaiki yang telah rusak, dan memastikan bahwa pengembangan masa depan berlangsung dalam kerangka yang berkelanjutan.

Keterlibatan semua pihak, mulai dari pemerintah, industri, hingga masyarakat, menjadi kunci dalam implementasi manajemen rekayasa lingkungan yang efektif. Dengan mengadopsi pendekatan yang berbasis pada kolaborasi dan inovasi, kita dapat menciptakan solusi yang tidak hanya mengatasi masalah lingkungan saat ini tetapi juga mengantisipasi tantangan yang akan datang. Dengan demikian, manajemen rekayasa lingkungan bukan hanya tentang mengelola isu lingkungan saat ini, tetapi juga tentang merencanakan dan membangun masa depan yang lebih berkelanjutan untuk generasi yang akan datang.

Bab 2

TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM REKAYASA LINGKUNGAN

2.1. Teknologi Hijau dalam Rekayasa Lingkungan

Teknologi hijau merupakan semua teknologi yang ramah lingkungan di rantai produksinya. Bahan baku, proses produksi hingga produk dihasilkan tidak mencermari lingkungan sehingga disebut juga teknologi bersih. Dalam ilmu rekayasa lingkungan, teknologi hijau dianggap sebagai teknologi berkelanjutan yang menjadi solusi secara ekonomi, hemat sumber daya, dan ramah lingkungan. Adanya teknologi hijau membuat efek negatif terhadap lingkungan dapat dikurangi (Joan, 2024).

Teknologi hijau ini, antara lain memanfaatkan energi matahari, angin, air, dan biomassa yang lebih ramah lingkungan, jika digunakan bahan bakar yang bersumber dari fosil. Teknologi hijau juga berkontribusi terhadap penggunaan bahan kimia berbahaya pada industri, penghematan air melalui efesiensi teknologi, serta pengelolaan limbah yang lebih baik melalui daur ulang dan pengurangan limbah. Teknologi Hijau diimplementasikan pada berbagai sektor, seperti energi, transportasi, pertanian, dan lainnya(Vanya, 2021).

Teknologi ramah lingkungan diprioritaskan sebagai strategi untuk mengurangi perubahan iklim oleh pemerintah di seluruh dunia. Banyak pemerintah membuat peraturan dan undang-undang negara untuk mendorong penerapan teknologi secara luas. Misalnya, banyak pemerintah di berbagai negara memberikan insentif keuangan, seperti pembebasan pajak, untuk membangun bangunan hemat energi. Pemerintah mengembangkan standar energi terbarukan untuk

memastikan listrik yang dihasilkan cukup dari sumber daya yang berkelanjutan. Perjanjian internasional berupaya mengurangi pemanasan global dengan mendorong pemerintah untuk membatasi emisi karbon (Rifqi, 2022).

2.1.1. Produksi Ramah Lingkungan

Produksi ramah lingkungan atau green manufacturing adalah upaya peningkatan proses produksi dengan cara yang ramah lingkungan. Produksi ramah lingkungan melibatkan seluruh proses produksi, dari bahan mentah hingga produk akhir. Hal ini termasuk penggunaan sumber daya terbarukan, proses hemat energi, dan daur ulang bahan limbah. Contoh praktik produksi ramah lingkungan termasuk penggunaan bahan daur ulang di bidang manufaktur, dan merancang produk dengan masa pakai lebih lama(Despasya, 2022).

Produksi berkelanjutan, juga dikenal sebagai produksi ramah lingkungan, mengacu pada penggunaan produk dan jasa yang memenuhi kebutuhan dasar dan meningkatkan kualitas hidup dengan mengurangi penggunaan bahan beracun, sumber daya alam, bahan beracun, dan emisi gas dan polutan selama siklus hidup produk dan jasa tersebut, sehingga tidak membahayakan generasi mendatang (Ari, 2020). Produksi ramah lingkungan meningkatkan pertumbuhan ekonomi tanpa membuat lingkungan menjadi tercemar, meningkatkan efisiensi sumber daya (Andri, 2023).

Banyak perusahaan memproduksi produk-produk yang dibuat secara khusus dari bahan-bahan alami atau mudah diurai oleh bakteri. Tujuan produksi ini agar mendapatkan keuntungan namun tetap mempertahankan daya dukung lingkungan. Produk yang dihasilkan seperti kertas daur ulang, spons dari sabut kelapa, dan produk yang menggunakan botol bekas(Dede, 2023).

2.1.2. Pengurangan Penggunaan Limbah

Teknologi ramah lingkungan mengurangi produksi limbah selama produksi, sehingga mendorong keberlanjutan. Penerapan teknologi untuk mengembangkan produk yang tahan lama dengan

mengurangi jumlah sampah yang dihasilkan selama proses produksi. Saat ini banyak industri meminimalkan timbulan limbah, mempromosikan energi ramah lingkungan, menurunkan emisi karbon, dan meningkatkan reputasi mereka sebagai bisnis yang bertanggung jawab terhadap lingkungan. Teknologi ramah lingkungan menghasilkan peluang ekonomi, seperti pengembangan lapangan kerja di industri daur ulang dan penggunaan kembali, serta meningkatkan daya saing pasar(Li et al., 2023).

2.2. Inovasi Terkini dalam Rekayasa Lingkungan

Saat ini banyak teknologi hijau yang diimplementasikan dalam upaya mengurangi dampak lingkungan yang merugikan. Berbagai macam inovasi yang dilakukan untuk mengatasi perubahan iklim saat ini, antara lain mengimplementasikan teknologi transportasi berbasis pada bahan bakar ramah lingkungan (kendaraan listrik, kendaraan menggunakan BBM biofuel), konstruksi berkelanjutan (menggunakan bahan-bahan konstruksi yang ramah lingkungan) (Li et al., 2023).

2.2.1. Transportasi Berkelanjutan

Transportasi berkelanjutan memiliki potensi untuk mengurangi biaya bahan bakar dan biaya operasional. Menggunakan kendaraan yang lebih efisien secara energi dapat membantu mengurangi pengeluaran bulanan karena harga bahan bakar fosil terus meningkat, karena kurangnya suku cadang yang bergerak dan perawatan rutin yang lebih sedikit, pemeliharaan kendaraan berkelanjutan biasanya lebih murah. Penggunaan kendaraan berkelanjutan juga dapat menghemat uang untuk bahan bakar dan mengurangi kebutuhan akan sumber daya alam yang lebih sedikit (Takacs, 2023).

Teknologi terbaru dalam bidang transportasi yang ramah lingkungan seperti mobil listrik, transportasi umum berbasis listrik, dan kendaraan yang menggunakan hidrogen. Teknologi hijau seperti pengembangan mobil listrik dan infrastruktur pengisian daya dapat mengurangi emisi karbon kendaraan bermotor. Dengan meningkatnya jangkauan kendaraan listrik dan infrastruktur pengisian baterai, kendaraan listrik menjadi pilihan yang menarik bagi individu dan organisasi yang peduli dengan lingkungan (Guo & Tan, 2024).

Keuntungan kendaraan listrik membuatnya menjadi opsi kendaraan ramah lingkungan yang menarik. Kendaraan listrik tidak menghasilkan gas buang yang berkontribusi terhadap polusi udara dan pemanasan global, sehingga meningkatkan kualitas udara di kota-kota dan mengurangi dampak negatifnya terhadap kesehatan manusia. Selain itu, kendaraan listrik menggunakan lebih sedikit energi untuk menghasilkan tenaga yang sama, sehingga lebih hemat biaya dalam jangka panjang. Pemakaian kendaraan listrik mengurangi ketergantungan kita pada bahan bakar fosil yang mahal dan tidak tersedia (Takacs, 2023).

Kendaraan yang ramah lingkungan atau "eko" tidak mengeluarkan polutan ke atmosfer. Pada kendaraan yang dilabelkan sebagai "ramah lingkungan", label "eko" menunjukkan bahwa perusahaan yang memproduksinya berkontribusi pada pengurangan gas pencemar di atmosfer, terutama karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NOx), hidrokarbon tak terbakar (HC), sulfur dioksida, dan senyawa timbal. Tidak adanya infrastruktur yang memadai untuk mengisi baterai merupakan kendala utama dalam penggunaan kendaraan listrik. Namun, infrastruktur ini telah berkembang dalam beberapa tahun terakhir dengan penambahan stasiun pengisian di berbagai tempat, seperti tempat parkir umum, pusat perbelanjaan, dan stasiun pengisian di jalan raya.(Bergougui & Aldawsari, 2024).

Dalam beberapa situasi, pengisian daya dengan mengisi kendaraan listrik di rumah menggunakan stasiun pengisian yang dipasang di garasi. Ini pasti akan membuat lebih mudah untuk mobil listrik mengisi daya kendaraan di malam hari atau saat mereka tidak digunakan. Dengan meningkatnya infrastruktur pengisian baterai, keterbatasan jangkauan kendaraan listrik semakin teratasi. Banyak kendaraan listrik saat ini memiliki jangkauan yang cukup panjang untuk digunakan setiap hari, dengan beberapa model mencapai lebih dari 300 kilometer. Teknologi baterai sangat penting untuk kemajuan kendaraan listrik. Dengan baterai yang lebih besar dan efisien, kendaraan listrik dapat mencapai jangkauan yang lebih luas dan waktu pengisian yang lebih singkat (Guo & Tan, 2024).

Penelitian dan pengembangan terbaru bertujuan untuk meningkatkan kinerja baterai lithium-ion baru dengan kapasitas yang lebih besar dan waktu pengisian yang lebih cepat. Ini adalah salah satu inovasi terbaru yang sedang dikembangkan. Selain itu, jangkauan dan umur baterai yang lebih panjang sedang dipelajari dalam penelitian baterai berbasis solid-state. Kendaraan hibrida adalah jenis kendaraan yang menggunakan baterei yang menggabungkan teknologi listrik dan mesin pembakaran internal. Model ini menggunakan baterai untuk mendukung mesin pembakaran internal, sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi. Selain itu, kendaraan hibrida dapat mengisi ulang baterai saat pengereman dan beroperasi pada kecepatan konstan, sehingga memaksimalkan penggunaan energi (Guo & Tan, 2024).

Salah satu keuntungan kendaraan hibrida adalah lebih fleksibel. Kendaraan ini digunakan untuk berbagai jenis perjalanan pengemudi, seperti perjalanan jarak jauh. Selain itu, kendaraan ini sangat cocok untuk transisi ke kendaraan listrik. Namun, kendaraan ini membutuhkan jangkauan pengisian baterai yang lebih luas atau infrastruktur pengisian yang lebih baik. Banyak jenis kendaraan hibrida tersedia. Pertama, kendaraan hibrida paralel menggunakan kedua motor listrik dan mesin pembakaran internal untuk menggerakkan kendaraan. Dalam model ini, mesin pembakaran internal hanya digunakan untuk mengisi daya baterai saat diperlukan. Di sisi lain, kendaraan hibrida serial menggunakan motor listrik sebagai sumber tenaga utama untuk menggerakkan kendaraan, dan mesin pembakaran internal hanya digunakan untuk mengurangi beban pada mesin pembakaran internal. Ketiga, kendaraan hibrida plugin dapat diisi daya listrik dari sumber eksternal, seperti stasiun pengisian baterai. Jenis ini biasanya memiliki jangkauan yang lebih luas dan dapat digunakan pada mode listrik selama beberapa waktu sebelum beralih ke mesin pembakaran internal (Bergougui & Aldawsari, 2024).

Kendaraan hibrid mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara, meningkatkan efisiensi energi dengan mengoptimalkan penggunaan energi, dan mengurangi pemborosan. Dalam jangka panjang, bahan bakar dihemat dan biaya operasional dikurangi. Kendaraan hidrogen menggunakan hidrogen untuk menggerakkan mesinnya dan menghasilkan emisi air, menjadikannya salah satu

kendaraan paling ramah lingkungan. Namun, kendaraan hidrogen masih sangat baru dan belum umum (Bergougui & Aldawsari, 2024).

Selain itu, ada kendaraan hidrogen, yang memiliki beberapa manfaat dan menjadi teknologi masa depan. Keuntungan ini meliputi:

a. Kendaraan hidrogen hanya menghasilkan air sebagai produk samping, sehingga emisi gas buang tidak ada sama sekali.
b. Jarak dan waktu pengisian, kendaraan hidrogen mempunyai jangkauan lebih panjang dibandingkan dengan kendaraan listrik, waktu pengisian daya yang lebih cepat dan efesien. Pemilik kendaraan dapat mengisi tangki hidrogen pada waktu yang relatif singkat dan melakukan perjalanan jarak jauh tanpa kekhawatiran habis energi.
c. Infrastruktur pengisian, infrastruktur pengisian hidrogen saat ini dikembangkan. Stasiun pengisian hidrogen saat ini sudah mulai muncul di beberapa daerah, memungkinkan pemilik kendaraan hidrogen mengisi daya dengan mudah.

Walaupun mempunyai potensi besar, kendaraan hidrogen menghadapi beberapa tantangan dan permasalahan dalam pengembangannya. Tantangan ini seperti infrastruktur pengisian hidrogen masih terbatas pada beberapa daerah tertentu. Diperlukan investasi dan perkembangan lebih lanjut dalam infrastruktur ini agar menciptakan jaringan yang lebih luas dan memadai. Selain itu, kendaraan hidrogen masih mempunyai biaya yang tinggi dibandingkan kendaraan konvensional atau kendaraan berbasis baterai. Tetapi, peningkatan produksi dan perkembangan teknologi, diharapkan permasalahan biaya akan menjadi lebih terjangkau di masa depan. Permasalahan lain, produksi hidrogen ramah lingkungan dan efisien masih menjadi tantangan. Sebagian besar hidrogen diproduksi hanya dari bahan bakar fosil dan berkontribusi pada emisi gas rumah kaca. Untuk itu, dibutuhkan pengembangan lebih lanjut dalam produksi hidrogen dari sumber energi terbarukan. Kendaraan paling ramah lingkungan memberikan banyak keuntungan yang signifikan. Kendaraan hidrogen mengurangi emisi gas rumah kaca, seperti karbon dioksida (CO_2) yang dapat berkontribusi pada perubahan iklim (Bergougui & Aldawsari, 2024).

2.2.2. Pengelolaan Sampah Daur Ulang

Daur ulang dilakukan untuk mengelola sampah yang dihasilkan dari aktivitas sehari-hari. Tentunya, daur ulang bukan hanya membantu mengurangi sampah, daur ulang yang tepat juga bisa menghasilkan produk yang bernilai tinggi. Mengacu pada UU Nomor 18 Tahun 2008, sampah yang dikelola yaitu sampah rumah tangga, sampah sejenis sampah rumah tangga, dan sampah spesifik. Sampah yang tidak dikelola dengan baik akan menimbulkan dampak negatif. Untuk itu, pengelolaan sampah berkelanjutan diperlukan agar mencapai berbagai target utama pembangunan berkelanjutan. Pengelolaan sampah berkelanjutan adalah salah satu bentuk tanggung jawab atas konsumsi dan produksi yang telah dilakukan. Konsumsi berlebih akan menghasilkan sampah yang berlebih sehingga memengaruhi luasnya tempat pembuangan sampah. Banyak pantai yang dipenuhi oleh buangan bahan dan zat berbahaya serta berbagai macam jenis sampah, seperti sisa jaring ikan plastik, puntung rokok, dan sedotan plastik. Ini akan memengaruhi ekosistem yang ada di laut. Selain ekosistem laut, sampah yang tidak dikelola secara baik memengaruhi ekosistem darat. Contohnya adalah sampah anorganik plastik yang tidak dapat terurai di tanah sehingga banyak sampah plastik berukuran besar hingga kecil sampai mikroplastik yang menyumbat saluran air maupun sungai, sehingga dapat tertelan oleh beberapa hewan yang hidup di air. dampak mikroplastik yang terpapar pada tubuh manusia adalah dapat terendap di saluran pernapasan, saluran pencernaan, dan pada beberapa organ lain. Endapan mikroplastik dalam tubuh merupakan endapan benda asing yang tidak dapat dicerna oleh tubuh. Ini dapat menyebabkan iritasi, jika dibiarkan terlalu lama akan terjadi peradangan yang menjadi pemicu timbulnya tumor bahkan kanker ganas.

Daur ulang sampah pada dasarnya berdasarkan pada piramida 6R dalam konsep zero waste(Nabila, 2020). Enam langkah yang dilakukan supaya terbebas dari masalah sampah sebagai berikut:

1. Rethink, membeli barang berdasarkan kebutuhan, perlu memprioritaskan produk daur ulang.

2. Refuse, tidak menggunakan barang-barang sekali pakai, seperti air dalam botol plastik.
3. Reduce, mengurangi penggunaan barang-barang berisiko menyebabkan pencemaran lingkungan, contohnya mengonsumsi air minum dalam kemasan botol.
4. Reuse, menggunakan kembali barang-barang yang dapat bermanfaat, seperti menggunakan tas kain untuk berbelanja.
5. Repair, memperbaiki barang rusak dan menggantinya dengan barang baru.
6. Recycle, proses daur ulang untuk mengurangi sampah dan meningkatkan nilai pakai, dan nilai ekonomi suatu barang.

Daur ulang sampah secara teratur juga dapat membantu mengurangi jumlah sampah yang sudah melebihi kapasitas tampung di Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Jumlah sampah yang berlebihan dapat mencemari lingkungan. Kedua, sepenuhnya mendukung upaya konservasi sumber daya alam. Daur ulang sampah dapat mengurangi eksploitasi sumber daya alam seperti penambangan dan penebangan pohon. Selain itu manfaat lain adalah sebagai berikut:

a. Memaksimalkan penghematan energi karena proses daur ulang sampah tidak membutuhkan energi besar.
b. Daur ulang sampah dapat menurunkan emisi gas rumah kaca. Sebab proses pembakaran sampah dan aktivitas industri serta domestik akan mengeluarkan karbon dioksida (CO_2) dan gas metan yang dapat terperangkap pada atmosfer dan membuat temperatur menjadi lebih panas.
c. Peningkatan kesejahteraan hidup masyarakat sebab aktivitas perekonomian lebih lancar. Barang hasil daur ulang Usaha Mikro Kecil Menengah (UMKM) dapat dijual lagi dan pabrik daur ulang kemasan menyerap banyak pekerja.
d. Meminimalkan risiko penyebaran penyakit akibat mikroorganisme berbahaya (bakteri dan lain-lain) yang terdapat pada sampah organik. Selain itu penyakit yang diakibatkan oleh

sampah plastik yang terdegradasi menjadi mikroplastik dan nanoplastik.

e. Lingkungan menjadi lebih bersih dan indah karena tidak ada penumpukan sampah semakin berkurang.

2.2.3. Bahan Bakar Alternatif

Perasalahan lingkungan saat ini disebabkan oleh adanya bahan bakar alternatif yang tidak ramah lingkungan. Ini membuat, permintaan terhadap bahan bakar yang lebih ramah lingkungan meningkat. Jenis bahan bakar ini sebagai solusi yang diperlukan untuk mengurangi emisi karbon berlebihan dan menangani masalah perubahan iklim. Sebab, bahan bakar alternatif yang dikenal juga dengan bahan bakar terbarukan berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui seperti angin, energi matahari, air, biomassa, dan panas bumi. Jika, membandingkan dengan bahan bakar fosil konvensional seperti minyak bumi dan batu bara, bahan bakar alternatif menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah atau bahkan tidak ada emisi (Nena, 2024).

a. Energi Matahari

Bahan bakar terbarukan yang populer dan ramah lingkungan adalah energi matahari. Panel surya terdiri dari sel surya, yang merupakan bahan semikonduktor yang menghasilkan arus listrik ketika terkena sinar matahari dan mengubah energi matahari menjadi listrik. Salah satu keuntungan menggunakan energi matahari sebagai sumber energi ramah lingkungan adalah bahwa itu tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca, memiliki sumber energi yang tak terbatas, dan tidak mahal dalam jangka panjang. Namun demikian, penggunaan energi matahari masih menghadapi beberapa masalah. Salah satunya adalah kebutuhan untuk bergantung pada cuaca dan lokasi geografis, yang keduanya mempengaruhi efisiensi panel surya.

b. Energi Angin

Turbin angin, yang memiliki baling-baling yang berputar karena hembusan angin, dapat mengubah energi angin menjadi energi listrik. Gerakan angin menghasilkan energi kinetik, yang dapat diubah menjadi

energi listrik oleh generator. Penggunaan energi angin sebagai sumber bahan bakar yang ramah lingkungan memiliki beberapa keuntungan. Pertama, energi angin tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca, yang mencemari lingkungan. Kedua, energi angin adalah sumber energi yang dapat diandalkan dan tak terbatas, dan ketiga, menggunakan energi angin dapat mengurangi ketergantungan kita pada bahan bakar fosil, yang saat ini semakin mahal dan tidak dapat diandalkan.

c. Energi Air

Tenaga air telah digunakan selama berabad-abad. Pembangkit listrik tenaga air menggunakan aliran air kuat, seperti sungai atau air terjun, untuk menggerakkan turbin yang terhubung ke generator listrik. Energi air adalah bahan bakar yang ramah lingkungan dan memiliki banyak keuntungan. Pertama, energi air tidak mencemari lingkungan dan tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca. Kedua, air adalah sumber energi yang dapat diandalkan dan tak terbatas. Terakhir, penggunaan energi air dapat mengurangi ketergantungan kita pada bahan bakar fosil yang terbatas dan semakin mahal.

d. Biomassa

Biomassa adalah bahan organik yang dibuat oleh hewan dan tanaman dan digunakan sebagai bahan bakar terbarukan. Pembakaran, pirolisis, dan gasifikasi adalah beberapa proses panas yang dapat mengubah biomassa menjadi energi. Proses ini mengubah biomassa menjadi cairan, gas, dan padatan yang digunakan sebagai bahan bakar. Penggunaan biomassa sebagai bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan memiliki beberapa keuntungan. Pertama, biomassa berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui, seperti sisa tanaman, limbah pohon, kayu, batang, dan kotoran hewan. Kedua, penggunaan biomassa dapat mengurangi ketergantungan kita pada bahan bakar fosil yang semakin langka dan mahal. Ketiga, penggunaan biomassa dapat membantu mengurangi limbah organik dan mengelola limbah.

Salah satu bahan bakar alternatif adalah biofuel. Biofuel dapat menjadi alternatif pengganti bahan bakar fosil yang tidak ramah lingkungan. Hal ini karena pengembangan biofuel dapat mengurangi

penggunaan bahan bakar fosil yang terus meningkat. Bahan bakar jenis ini berasal dari tumbuhan dan hewan. Misalnya, proses yang digunakan dalam produksi biofuel adalah transesterifikasi yang mengubah minyak sawit mentah menjadi biodiesel dan fermentasi jagung serta tebu untuk menghasilkan etanol. Pembuatan Biofuel dengan proses fermentasi bagian tanaman yang mengandung pati, karbohidrat, dan gula. Proses transesterifikasi biofuel dapat menggunakan tanaman non-pangan, limbah pertanian, dan residu yang manusia tidak mengonsumsinya. Proses ini menggunakan teknologi teknologi terbaru seperti hydrocracking (Laila, 2023).

Pembangkit listrik, alat transportasi, peralatan listrik, dan peralatan memasak seperti kompor dapat menggunakan biofuel. Biofuel seperti bioetanol menghasilkan lebih sedikit karbon dioksida daripada bahan bakar fosil. Teknologi pembuatan biofuel lebih efisien dan saat ini sedang dikembangkan. Pengembangan biofuel pada empat generasi (Fajar, 2024).

1. Pertama

Generasi pertama biofuel—terdiri dari bioetanol dan sering dikombinasikan dengan bensin, biodiesel, dan biosolar—membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Ini juga dibuat dari minyak nabati, seperti minyak sawit, tebu, dan jagung.

2. **Kedua**

Biofuel generasi kedua, pembuatan biofuel menggunakan bahan baku non-pangan seperti kayu, limbah pertanian seperti jerami dan sekam padi. Bahan baku non-pangan bukan makanan, sehingga baik digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

3. **Ketiga**

Biofuel generasi ketiga pada umumnya berasal dari mikroorganisme dan alga. Laju pertumbuhan kedua mahluk hidup ini cepat dan kandungan minyaknya tinggi, berpotensi untuk pengembangan bahan bakar yang efesien. Saat ini menjadi subjek penelitian dan pengembangan karena menjadi bahan bakar alternatif yang lebih efisien.

4. **Keempat**

Pada generasi keempat, dibuat dengan mengubah bahan baku organisme yang dimodifikasi secara genetik untuk meningkatkan kandungan energi dan efisiensi konversi. Saat ini, sedang dikembangkan untuk menghasilkan biofuel yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Bahan bakar alternatif lain yang lebih ramah lingkungan terbagi menjadi beberapa sebagai berikut:

a. Bioetanol

Bioetanol merupakan jenis alkohol yang berasal dari fermentasi biomassa dengan bantuan mikroorganisme. Bahan baku fermentasi seperti jagung, tebu, gula, dan lainnya pangan lainnya. Hasil fermentasi diproses dengan metode distilasi untuk mendapatkan kadar alkohol murni

b. Biodiesel

Pembuatan biodiesel menggunakan berbagai biji-bijian tanaman dengan proses transesterifikasi yang dapat mengubah minyak pada biji-bijian menjadi ester yang digunakan sebagai bahan bakar. Biodisel digunakan pada kendaraan diesel biasa dan hasil samping dari proses pembakaran tidak menghasilkan gas karbon dioksida (Laila, 2023).

c. Biogas

Biogas berasal dari proses penguraian zat organik oleh bakteri anaerob (bakteri yang tidak membutuhkan oksigen). Hasil penguraian ini dalam bentuk gas metana dan karbon dioksida. Zat organik yang digunakan dapat diperoleh dari limbah domestik atau limbah rumah tangga. Limbah domestik ini kaya akan zat organik yang terdekomposisi menjadi gas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar (Laila, 2023).

d. Bioavtur Sustainable Aviation Fuel (SAF)

Bioavtur merupakan jenis biofuel yang berasal dari minyak kelapa sawit atau minyak jelantah. Misalnya, bioavtur J2,4 adalah bahan bakar pesawat terbang, yang merupakan campuran avtur dengan 2,4 persen bioavtur berbasis minyak sawit (Laila, 2023).

e. Hidrogen

Hidrogen, bahan bakar yang ramah lingkungan yang dihasilkan melalui proses elektrolisis air, dapat digunakan pada kendaraan bermotor yang menggunakan sel bahan bakar hidrogen. Dengan menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar alternatif, air adalah satu-satunya produk sampingan dan emisi tidak merugikan lingkungan. Produksi dan penyimpanan hidrogen yang aman dan efisien masih menjadi masalah yang perlu ditangani.

f. Gas Alam Terkompresi (CNG)

Gas alam terkompresi (CNG) merupakan salah satu bahan bakar ramah lingkungan yang terdiri dari metana alam yang terkompresi menjadi bentuk gas. Bahan bakar ini digunakan sebagai pengganti bensin atau diesel dalam kendaraan bermotor.

g. Biopelet

Biopelet merupakan jenis bahan bakar terbarukan yang bersumber dari berbagai jenis biomassa, seperti sisa jerami, serbuk kayu, dan bahan organik lainnya. Sisa-sisa ini dikeringkan, dipadatkan, dan kemudian dibentuk menjadi pelet kecil yang siap digunakan sebagai bahan bakar. Biopelet dapat menggantikan bahan bakar fosil pada sistem, pembangkit listrik, kompor, pemanas, dan boiler.

h. Dimetil Eter

Bahan bakar alternatif lain yang ramah lingkungan adalah dimetil eter (DME), berbentuk gas pada suhu kamar dan memiliki rumus kimia CH_3OCH_3 dan terdiri dari dua molekul metanol. DME dibuat melalui reaksi kimia antara metanol dan katalis asam. Metanol dapat diperoleh dari berbagai sumber, seperti gas alam, batubara, atau biomassa, dan merupakan bahan baku utama produksi dimetil eter. Karena sifat pembakarannya yang bersih dan tidak menghasilkan emisi belerang, dimetil eter dianggap sebagai bahan bakar yang dapat menggantikan diesel.

i. Biosolar B30

Biosolar B30 adalah bahan bakar yang terdiri dari campuran biodiesel 30% dan solar 70% ditambahkan dengan bahan baku nabati atau tumbuhan seperti kedelai, biji rami, dan jarak pagar. Biosolar B30 dapat

menggantikan sebagian bahan bakar yang berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui dan lebih ramah lingkungan. Penggunaan biosolar B30 hanya memerlukan kendaraan atau mesin diesel biasa tanpa modifikasi mesin tersebut.

2.2.4. Konstruksi Berkelanjutan

Konstruksi Berkelanjutan dikenal juga sebagai konstruksi ramah lingkungan, merupakan pendekatan pembangunan yang mengutamakan prinsip-prinsip kelestarian lingkungan. Tujuan pendekatan ini untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan selama proses pembangunan dan siklus hidup bangunan. Prinsip-prinsip konstruksi berkelanjutan antara lain penggunaan material ramah lingkungan. Material yang digunakan dalam konstruksi berkelanjutan memiliki emisi karbon rendah, dapat didaur ulang, dan berasal dari sumber yang berkelanjutan. Contohnya bambu, kayu, bata ringan, dan material daur ulang. Prinsip berikutnya yakni adanya efisiensi energi, bangunan yang dirancang dengan prinsip konstruksi berkelanjutan harus hemat energi. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan desain yang memaksimalkan pencahayaan alami, ventilasi alami, dan sistem energi terbarukan seperti panel surya. Adannya penghematan air, penggunaan air yang efisien sangat penting dalam konstruksi berkelanjutan(Kimsan, 2023).

Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan sistem plumbing yang hemat air, panen air hujan, dan penggunaan air daur ulang. Pengelolaan limbah, konstruksi berkelanjutan harus meminimalkan produksi limbah dan mengelola limbah dengan cara bertanggung jawab. Kesehatan dan kenyamanan penghuni, bangunan yang dirancang dengan prinsip konstruksi berkelanjutan harus memberikan kesehatan dan kenyamanan bagi penghuninya. Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan material yang tidak beracun, menyediakan ventilasi yang baik, dan menjaga kualitas udara dalam ruangan. Keuntungan konstruksi berkelanjutan(Triadi, 2019):

1. Melestarikan lingkungan, konstruksi berkelanjutan membantu mengurangi emisi karbon, menghemat sumber daya alam, dan melindungi keanekaragaman hayati.

2. Meningkatkan kesehatan dan kenyamanan penghuni, bangunan yang dirancang dengan prinsip konstruksi berkelanjutan lebih sehat dan nyaman untuk ditinggali.
3. Menghemat biaya, konstruksi berkelanjutan dapat membantu menghemat biaya dalam jangka panjang melalui penghematan energi dan air.
4. Meningkatkan nilai properti, bangunan yang ramah lingkungan memiliki nilai properti yang lebih tinggi.

2.2.5. Pertanian Berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan didasarkan pada tiga konsep: ekologi, ekonomi, dan sosial. Pertanian berkelanjutan adalah pendekatan yang berfokus pada keberlanjutan ekologi dan ekonomi melalui prinsip utama seperti penggunaan sumber daya yang bijaksana, seperti pemupukan organik, pengendalian hama alami, dan pola tanam yang ramah lingkungan. Tujuan utama pertanian berkelanjutan adalah mencapai ketahanan pangan jangka panjang tanpa merusak keanekaragaman hayati (Ketut Sundra, 2017).

2.2.6. Informatika Hijau

Informatika hijau adalah konsep yang mengacu pada penggunaan teknologi informasi dan komputer dengan tujuan mengurangi penggunaan bahan berbahaya, mengoptimalisasi penggunaan tenaga, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan alam. Informatika hijau bertujuan untuk mengurangi emisi karbon dan mengurangi penggunaan energi yang tidak efisien. Konsep ini bertanggung jawab atas pengelolaan sumber daya alam, pengurangan dampak lingkungan, dan peningkatan efisiensi dalam penggunaan teknologi informasi dan komputer. Informatika hijau juga mencakup praktik yang disebut "green computing" atau "pengkomputeran hijau", yang meliputi penggunaan perangkat lunak dan perangkat hardware yang efisien dan ramah lingkungan, seperti pengurangan penggunaan listrik dan penggunaan bahan berbahaya(Kania, 2023).

Bab 3

TOKSIKOLOGI LINGKUNGAN PERAIRAN

3.1 Sumber, Mekanisme, dan Jenis Pencemaran Zat Toksik Perairan

Air merupakan suatu aspek yang sangat menunjang berbagai aspek kehidupan di bumi. Lingkungan perairan menjadi habitat bagi sejumlah makhluk hidup yang membuat hubungan timbal balik antar komponen. Apabila air tidak ada atau hilang, maka sama saja telah terjadi kehilangan kehidupan. Air digunakan dalam berbagai kegiatan, antara lain sebagai air minum, tempat hidup, kebutuhan sehari-hari, tempat mencari nafkah dan lain-lain. Biota air adalah contoh yang paling membutuhkan air yang baik. Biota air memanfaatkan lingkungan perairan untuk kelangsungan hidupnya. Biota air masuk dalam sistem rantai makanan, yang menempatkan biota air menjadi sumber makanan bagi makhluk hidup lain, termasuk manusia. Pada ekosistem perairan terjadi ketergantungan antara aspek biotik maupun abiotik. Aspek biotik terdiri dari makhluk hidup yang tinggal di lingkungan perairan seperti tumbuhan, hewan, dan manusia. Sementara aspek abiotik terdiri dari parameter lingkungan seperti air, tanah, udara, dan sedimen. Salah satu permasalahan yang menggangu kesetimbangan ekosistem perairan adalah pencemaran air. Kualitas air yang baik sangat dibutuhkan untuk keberlanjutan ekosistem perairan. Namun hal ini sering tidak didapatkan karena adanya pencemaran air. Penurunan kualitas air dapat bersumber dari aktvitas manusia itu sendiri.

A. Sumber dan Mekanisme Pencemaran Zat Toksik

Zat toksik masuk dalam perairan dapat berasal dari beberapa sumber. Pencemaran air dapat terjadi oleh dampak zat-zat toksik yang

masuk ke dalam air melalui proses dan mekanisme pencemaran. Air harus adalah molekul senyawa murni, tidak berasa, tidak berwarna, dan tidak berbau. Namun apabila terdapat indikasi perubahan pada hal-hal tersebut, maka dapat disimpulkan telah terjadi pencemaran. Suatu perairan dapat dikatakan tercemar apabila terjadinya perubahan keadaan atau fase air melalui parameter-parameter pengamatan yang terdapat pada badan air seperti sungai, waduk, air tanah, dan laut. Perubahan sifat air yang disebabkan oleh zat toksik biasanya disebabkan oleh aktivitas manusia yang menghasilkan polutan. Sumber air dari waduk, sungai, danau, air tanah, dan laut merupakan bagian penting dalam siklus hidrologi dan keberlanjutan siklus kehidupan manusia. Air bertindak sebagai pelarut universal, dimana air dapat melarutkan zat polutan seperti limbah padat, cair, maupun gas. Air mempuntai berbagai manfaat yang sangat berkontribusi terhadap kehidupan makhluk hidup. Manusia telah memanfaatkan lingkungan perairan serta potensinya. Salah satu pemanfaatannya adalah sebagai tempat kegiatan budidaya perikanan. Dalam PP No 20/1990 tentang Pengendalian Pencemaran Air, pencemaran air di definisikan sebagai: "Pencemaran air adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan atau komponen lain ke dalam air oleh kegiatan manusia sehingga kualitas dari air tersebut turun hingga batas tertentu yang menyebabkan air tidak berguna lagi sesuai dengan peruntukannya. (Pasal 1, angka 2).

Pencemaran air dapat terjadi pada badan air seperti danau, sungai, laut, dan air tanah. Semua tempat tersebut merupakan sumber pemasukan dan penggunaan air oleh makhluk hidup. Jika air didapatkan dari sumber tersebut namun tidak dapat digunakan karena kelayakannya, maka air tersebut telah terkontaminasi zat toksik. Selain akibat aktivitas manusia, sumber zat toksik juga dapat diakibatkan oleh permasalahan lain yang berkaitan dengan lokasi kegiatan penggunaan sumber daya air, seperti fenomena alam. Meskipun penyebab utama perubahan kualitas air adalah faktor alamiah seperti letusan gunung berapi, gempa bumi, hujan, tsunami, namun faktor tersebut tidak dapat secara langsung dijadikan alasan penyebab air tercemar. Secara umum pencemaran air mayoritas diakibatkan oleh buangan limbah industri,

limbah rumah tangga pemukiman, aktivitas pertanian, limbah domestik, limbah industri, dan cara penangkapan ikan dengan merusak lingkungan. Polutan zat toksik antara lain bahan organik dan anorganik yang merupakan sumber paling utama dalam terjadinya pencemaran air. Selain itu, pemanfaatan tidak bertanggung jawab dengan pembukaan lahan hutan, baik pembukaan lahan pertanian perkebunan, pembangunan jalan, perumahan, dan gedung lainnya, menyebabkan pencemaran air tanah. Pencemaran limbah rumah tangga seperti sisa makanan, kaca, plastik, sterofoam, deterjen, dan lain-lain juga berperan penting dalam pencemaran air.

Bahan zat toksik yang masuk pada air terdiri dari zat kimia seperti logam berat, senyawa organik, selain itu, dari zat biologi terdiri dari mikroorganisme patogen yang dapat menyebabkan sifat fisik dan kimia perairan mengalami perubahan. Pencemaran dari unsur kimia banyak yang merupakan zat toksik yang dapat mencemari air. Bakteri patogen juga dapat mencemari air dan menyebabkan dampak negatif terhadap kesehatan pada manusia dan hewan. Sifat fisik dan kimia air terdiri dari derajat keasaman, konduktivitas listrik, suhu, senyawa nitrogen, dan pemupukan permukaan. Pencemaran air merupakan penyebab terbesar gangguan kesehatan manusia di negara berkembang seperti Indonesia.

Berdasarkan pengertian pencemaran air, dapat diketahui bahwa sumber zat toksik pada pencemaran air adalah masuknya zat, makhluk hidup, energi, atau komponen lainnya sehingga menurunkan mutu air dan air menjadi tidak murni dan terkontaminasi. Penyebab pencemaran dapat berasal dari sumber pencemaran air. Sumber pencemaran terdiri dari sumber pencemaran langsung dan tidak langsung. Sumber langsung contohnya limbah industri, tempat pembuangan sampah, rumah tangga yang langsung masuk ke badan air. Sumber tidak langsung contohnya zat toksik yang masuk ke badan air sebagai hujan yang melewati tanah, air tanah atau atmosfer. Sumber pencemaran dari daratan dapat berasal dari aktivitas pertanian, perkebunan, perikanan budidaya. Pencemaran dari udara juga berasal dari aktivitas manusia, yaitu pencemaran udara yang menyebabkan hujan asam. Berikut adalah gambar sumber pencemaran air (**Gambar 3.1)**.

Gambar 3.1 Sumber pencemaran, (kiri) langsung; (kanan) tidak langsung

Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa sumber pencemaran langsung adalah limbah yang langsung masuk ke badan air (gambar kiri). Limbah langsung dibuang masuk ke badan air. Inilah yang dimaksud dengan pencemaran langsung. Sumber pencemaran tidak langsung adalah sumber pencemaran yang datang melalui aliran udara atau tanah yang dibawa oleh hujan. Sumber zat toksik tidak langsung masuk ke badan air, melainkan melewati beberapa tahapan. Sebagai contoh asap dari pabrik industri yang keluar dan terdistribusi di udara mengandung zat-zat pembawa yang toksik. Asap tersebut mengandung senyawa kimia sulfur (S) dan nitrogen (N). Pada udara terdapat gas oksigen (O_2) yang bereaksi dengan kandungan zat di asap, dan pada keadaan tertentu mengembun dan jatuh ke tanah. Proses lainnya yaitu zat toksik asap bereaksi dengan air hujan (H_2O) membentuk senyawa asam yang jatuh ke tanah bersama hujan. Itu sebabnya disebut hujan asam. Air yang jatuh ke tanah masuk ke dalam tanah hingga ke air tanah, danau, sungai, dan lautan. Berikut adalah mekanisme reaksi terjadinya hujan asam.

Pembentukan asam sulfat:

$$S_{(s)} + O_{2\,(g)} \rightarrow SO_{2\,(g)}$$

$$2SO_{2\,(g)} + O_{2\,(g)} \rightarrow 2SO_{3\,(g)}$$

$$SO_{3\,(g)} + H_2O_{\,(l)} \rightarrow H_2SO_{4\,(g)}$$

Pembentukan asam nitrat:

$$NO_{(g)} + H_2O_{\,(l)} \rightarrow NO_{2(g)} + OH$$

$$NO_{2\,(g)} + OH \rightarrow HNO_{3\,(g)}$$

- ***Bahan pencemaran air***

Bahan yang mencemari air biasanya berupa zat fisik, kimia, dan biologi. Zat fisik meliputi limbah padat yang bentuknya seperti kaleng, kayu, daun kering, lumpur, dan lain-lain. Zat kimia seperti senyawa organik, logam berat, senyawa anorganik. Zat biologi seperti bakteri, jamur, dan mikrorganisme patogen lainnya. Penggunaan bahan kimia untuk kehidupan sehari hari saat ini sangat banyak. Namun, limbah dari penggunaan bahan tersebut langsung dibuang ke badan air atau air tanah. Sebagai contoh air limbah budidaya perikanan yang banyak mengandung amonia, pestisida dari kegiatan pertanian, industri atau rumah tangga, sabun deterjen dari aktivitas rumah tangga atau Cd yang dari peralatan elektronik. Secara umum jenis jenis bahan limbah dapat dikategorikan sebagai berikut:

1. ***Bahan Limbah Padat***

Limbah padat adalah limbah yang berbentuk padat baik yang kasar maupun yang halus seperti sampah. Ketika limbah ini dibuang ke air, limbah tersebut menjadi tercemar dan menyebabkan pelarutan, pengendapan, atau pembentukan koloid. Sampah yang dibuang mayoritas sampah yang tidak bisa diurai sehingga menyebabkan penumpukan hingga menggangu kelancaran aliran air. Sampah ini menyebabkan pencemaran estetika lingkungan, udara, dan air. Bau yang menyengat menyebabkan manusia yang tinggal di sekitar terganggu dan menjadi sumber penyakit.

2. ***Bahan Limbah Organik***

Limbah organik biasanya berupa limbah yang dapat membusuk atau diuraikan oleh mikroorganisme, sehingga bila masuk ke dalam air akan menambah jumlah mikroorganisme. Jumlah mikroorganisme yang ada umumnya adalah mikroorganisme patogen pembawa penyakit. Sisa makanan, limbah organik, menjadikan air menjadi berbau akibat banyaknya jumlah mikroorganisme. Selain itu, akibat menumpuknya zat organik, dan diuraikan oleh mikroorganisme aerob menyebabkan rendahnya kandungan oksigen di perairan. Hal ini membuat kehidupan biota air kekurangan oksigen akibat hal tersebut.

3. *Bahan Limbah Anorganik*

Limbah anorganik pada umumnya adalah material yang sulit didegradasi oleh mikroorganisme. Bahan buangan ini contohnya logam berat. Logam berat adalah unsur yang mempunyai berat molekul yang besar. Apabilah perairan telah tercemar oleh logam berat, akan terakumulasi baik di sedimen, perairan, maupun biota perairan. Akumulasi ini terjadi akibat sifat logam berat yang tidak bisa diurai. Ketika memasuki air, jumlah ion logam di dalam air meningkat. Bahan limbah anorganik ini biasanya berasal dari limbah industri yang mengandung unsur logam seperti kadmium (Cd), merkuri (Hg), timbal (Pb), tembaga (Cu), kobalt (Co), dan lain-lain.

4. *Bahan Limbah Minyak*

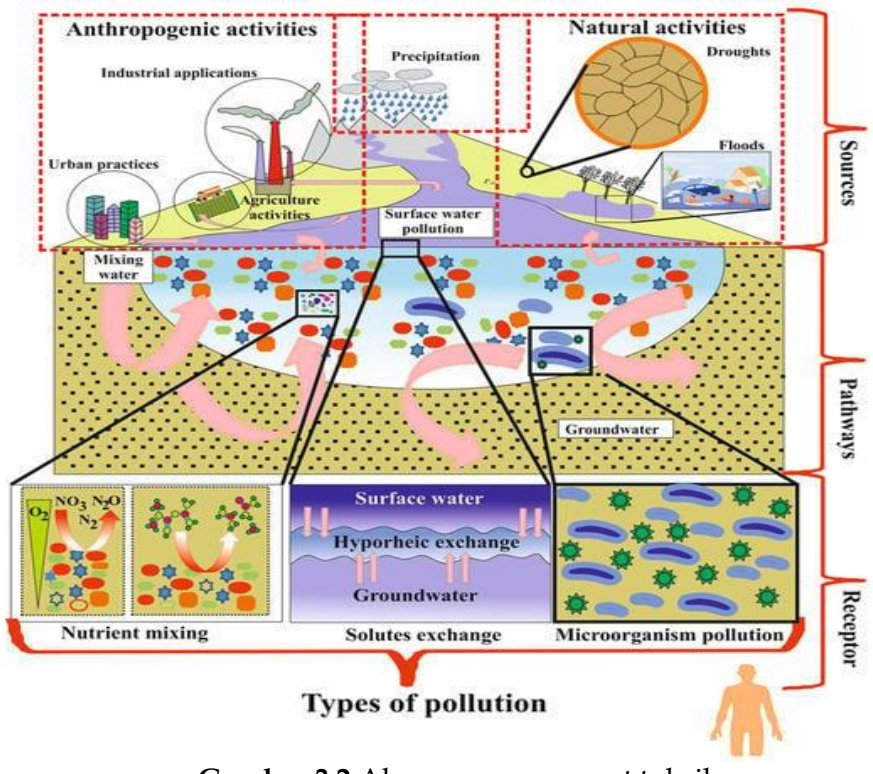
Pencemaran dari limbah ini pada umumnya banyak terjadi di lautan akibat tumpahan minyak dari kapal. Selain itu dapat juga akibat pembuangan langsung limbah minyak ke lingkungan perairan. Minya yang mencemari perairan akan mengapung menutupi permukaan air akibat perbedaan berat jenis. Apabila minyak mengandung senyawa yang mudah menguap, maka terjadi penguapan dan permukaan yang menutupi permukaan air minyak berkurang. Namun hal ini bergantung pada jenis minyak dan waktu. Meskipun beberapa mikroorganisme dapat memecahkan lapisan minyak pada permukaan air, namun proses tersebut membutuhkan waktu yang lama sehingga akan menggangu kehidupan biota perairan.

5. *Bahan Limbah Panas*

Suhu adalah parameter yang sangat mempengaruhi aktivitas perairan khususnya biota perairan. Perubahan kecil pada suhu air akan mempengaruhi proses metabolisme biota dan mengusir ikan atau spesies lain dan selanjutnya menurunkan kadar oksigen dalam air. Akibatnya ikan mati atau ekosistem rusak. Buangan berupa panas dapat terjadi apabila zat yang dibuang ke perairan memiliki suhu yang panas. Selain itu dapat terjadi akibat paparan langsung dengan mesin perkapalan yang mengeluarkan panas.

6. *Bahan Limbah Zat Kimia*

Limbah zat kimia mempunyai banyak jenis. Bahan buangan ini antara lain berupa limbah sabun seperti deterjen, sampo dan produk pembersih lainnya. Limbah pestisida dari aktivitas pertanian. Limbah dari aktivitas laboratorium. Zat toksik kimia tersebut masuk ke badan perairan hingga memberikan efek biotik dan abiotik melalui alur mekanisme dari sumber hingga penerima dampak. Sumber pencemaran baik langsung atau tidak langsung masuk ke badan perairan dengan mekanisme fisika, kimia, biologi, dengan mengikuti pergerakan aliran air. Reaksi-reaksi yang terjadi menyebabkan zat toksik dapat masuk hingga ke perairan. Air sebagai sumber yang banyak dibutuhkan oleh makhluk hidup, membawa zat toksik tersebut hingga ke pengguna air. Oleh karena itu beberapa efek toksikan baik akut maupun kronis terjadi pada makhluk hidup. Secara umum alur mekanisme pencemaran zat toksik adalah sebagai berikut.



Gambar 3.2 Alur pencemaran zat toksik
(Sumber: Akhtar *et al*., 2021)

B. Macam-Macam Pencemaran Zat Toksik

Pencemaran air adalah perubahan sifat dan fase air pada suatu badan perairan. Semua tempat dimana ada air dapat terkontaminasi zat toksik. Jenis pencemaran yang terjadi dapat dibedakan berdasarkan zat toksikan yang mencemari perairan. Segala jenis pencemaran dapat menyebabkan pencemaran air.Berdasarkan penyebab pencemaran maka pencemaran yang terjadi antar badan air air dapat berbeda dengan badan air yang lainnya. Pencemaran air disetiap tempat dapat berbeda-beda karena zat toksikan yang mencemari juga mempunyai macam dan jenis yang berbeda-beda. Berikut adalah macam-macam pencemaran yang dapat mencemari perairan:

a. ***Pencemaran Mikroorganisme***

Mikroorganisme adalah makhluk hidup berukuran kecil yang tidak terlihat langsung oleh mata. Oleh karena itu, untuk identifikasi pencemaran berdasarkan jenis ini cukup sulit harus menggunakan bantuan mikroskop. Pencemaran mikroba adalah pencemaran air yang disebabkan oleh mikroorganisme patogen. Air merupakan habitat bagi organisme hidup, seperti hewan air maupun mikroorganisme lainnya. Banyak jenis mikroorganisme yang hidup di air antara lain fitoplankton, protozoa, zooplankton, dan lain-lain. Mikroorganisme yang ada di dalam air ini sebenarnya berperan dalam membersihkan air dan lain sebagainya. Namun terkadang mikroorganisme ini juga berbahaya atau mencemari. Misalnya, jika jumlah mikroorganisme tersebut terlalu tinggi, justru dapat mengkontaminasinya. Pencemaran jenis ini ditandai dengan warna air yang keruh akibat kekurangan oksigen. Mikroorganisme juga banyak yang bersifat membawa penyakit bagi biota perairan lainnya. Oleh karena itu, apabila suatu biota air mengalami penyakit dapat mengindikasikan adanya pencemaran dari mikroba patogen.

b. ***Pencemaran Anorganik Nutrisi Tanaman***

Pencemaran akibat penggunaan bahan untuk menutrisi tanaman juga dapat menjadi sumber pencemaran. Pencemaran ini akibat unsur hara tanaman anorganik. Pada umumnya hal ini terjadi akibat aktivitas pertanian maupun Perkebunan. Aktivitas ini masih menggunakan pupuk nitrogen dan fosfat untuk mempercepat pertumbuhan tanaman. Selain

itu di zaman yang semakin modern, banyak petani yang beralih menggunakan pupuk kimia dibandingkan pupuk alami. Selain kepraktisan, alasannya pupuk kimia ini berkali-kali lipat lebih efektif dibandingkan pupuk alami. Tanaman yang diberi pupuk kimia lebih subur, kualitasnya lebih tinggi, dan hal ini tentunya sangat menguntungkan bagi petani. Namun ternyata penggunaan pupuk ini memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, khususnya air. Pupuk kimia tersebut sangat berbahaya bagi kualitas air dan juga bagi kelangsungan hidup biota perairan. Hal ini tentu akan berdampak pada masyarakat sebagai pengguna air. Air yang terkontaminasi bahan kimia tidak layak untuk dikonsumsi. Unsur hara dari pupuk juga dapat menyebabkan *blooming* alga akibar pencemaran nutrient tersebut. Hal ini akan berdampak negatif dengan kematian biota di perairan yang terjadi *blooming* alga.

c. ***Pencemaran Zat Kimia Anorganik***

Pencemaran selanjutnya adalah pencemaran anorganik. Perbedaan dengan pencemaran air anorganik yang disebabkan oleh unsur hara tanaman, pencemaran ini disebabkan bahan kimia anorganik. Aktivitas ini terkait dengan aktivitas sehari-hari manusia. Penggunaan bahan kimia seperti asam dan logam beracun seperti timbal, kadmium, dan merkuri dalam jumlah besar untuk aktivitas industry oleh manusia, yang pada akhirnya menimbulkan dampak polusi zat toksik yang sangat besar. Penggunaan ini akan beimplikasi terhadap kualitas air. Jika tidak dikontrol, efek samping akan muncul setelah beberapa waktu jika tidak dilakukan pengobatan yang tepat dan baik. Pencemaran anorganik dapat merusak alat-alat pertanian yang menyebabkan sifat korosi serta menurunkan produksi kegiatan. Oleh karena itu pencemaran ini memberikan dampak yang besar bagi ekosistem perairan.

d. ***Pencemaran Zat Kimia Organik***

Selain bahan kimia anorganik, terdapat juga bahan pencemar zat kimia organik. Bahan kimia organik tersebut antara lain senyawa organic seperti minyak, pestisida, sterofoam, larutan pembersih, kaleng, sabun deterjen, dan lain-lain. Banyak produk untuk menunjang aktivitas masyarakat dari terbuat bahan kimia organik. Apabila penggunaan

masih dalam jumlah kecil namun sering dalam jangka waktu lama menyebabkan polusi bertahap, termasuk polusi air. Pencemaran air yang disebabkan oleh bahan organik dapat menyebabkan kematian banyak tumbuhan dan hewan air seperti ikan, udang, dll. Ketika tumbuhan dan hewan air mati, kondisi air menjadi semakin buruk. Oleh karena itu, saat ini banyak alternatif bahan yang tidak terlalu banyak mengandung zat kimia.

3.2 Dampak Zat Toksik di Lingkungan Perairan

Pencemaran air yang disebabkan oleh zat-zat toksik dapat menimbulkan dampak yang luas, seperti meracuni sumber air minum, meracuni pakan ternak, mengganggu kestabilan ekosistem perairan, merusak hutan akibat hujan asam, dan lain-lain. Salah satu contohnya adalah ketika suatu perairan tercemar oleh racun pertanian, maka dapat berakibat pertumbuhan tidak terkendali oleh tanaman (eutrofikasi berlebihan). Apabila tanaman air tumbuh dengan pesat akan mengurangi oksigen yang seharusnya terdistrubis bagi biota. Saat tanaman air mengalami kematia, proses pembusukannya menyerap lebih banyak oksigen. Akibatnya ikan mati dan aktivitas bakteri menurun. Dampak pencemaran zat beracun terhadap air secara umum dibedakan menjadi misalnya dampak terhadap kehidupan akuatik, kualitas air tanah, dan kesehatan.

A. Dampak Terhadap Kehidupan Biota Air

Biota air adalah objek yang paling merasakan dampak akibat pencemaran air. Air merupakan habitat tempat mencari makan, berkembang biak, dan tempat tejadinya metabolisme tubuh biota air. Air juga sebagai media untuk mendistribusikan sumber oksigen yang sangat dibutuhkan oleh biota air. Zat toksik yang masuk ke perairan terus menerus akan terjadi akumulasi hingga melewati ambang batas toleransi. Pencemaran zat toksik dalam jumlah besar akan menyebabkan penurunan kandungan oksigen terlarut dalam air. Hal ini menyebabkan terganggunya kehidupan di dalam air yang membutuhkan oksigen dan menghambat perkembangannya. Penurunan oksigen akibat tumbuhnya mikroorganisme pengurai zat toksik yang memanfaatkan oksigen di perairan. Oksigen terlarut di perairan sangat menentukan kehidupan

organisme akuatik. Batas toleransi oksigen organisme bergantung pada jenis organisme di dalam air. Secara umum oksigen terlarut perairan adalah 3-5 ppm. Selain proses pernafasan, oksigen juga mempengaruhi aktivitas kehidupan organisme lain yaitu meningkatkan nafsu makan ikan atau organisme air lainnya. Hal ini juga mempengaruhi kesehatan ikan. Jumlah oksigen juga mempengaruhi fungsi fisiologis dan pertumbuhan ikan dan apabila melewati batas ambang baku mutu dapat menyebabkan kematian. Apabila konsentrasi DO > 12 ppm ini akan berdampak negatif karena dapat menyebabkan penyakit akibat gelembung gas.

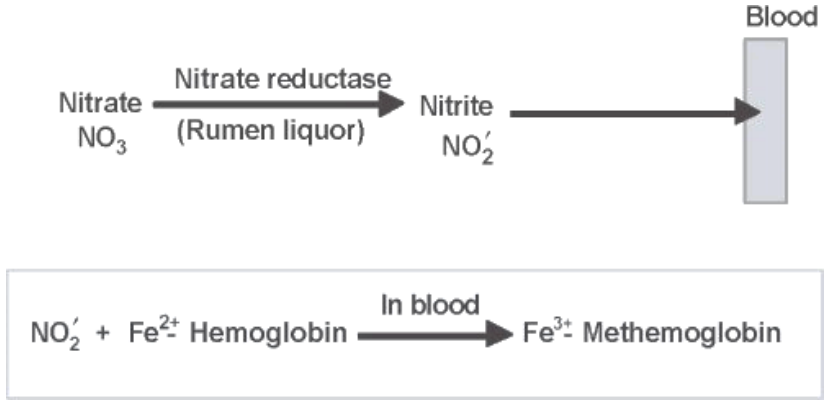
Buangan suhu panas akibat proses industri yang memerlukan tenaga mesin juga berdampak pada kematian organisme. Biota air sangat sensitive terhadap perbuhan suhu perairan. Perubahan pH dalam air merupakan faktor kimia yang sangat mempengaruhi kehidupan organisme yang hidup di lingkungan perairan. Pengaruh yang diberikan dapat terjadi secara langsung atau tidak langsung. Ketika pH turun maka konsentrasi oksigen terlarut menurun sehingga mengakibatkan penurunan konsumsi oksigen organisme perairan, nafsu makan organisme perairan. Dalam kondisi dasar, yang terjadi justru sebaliknya. Oleh karena itu, budidaya perikanan tumbuh subur di air dengan pH 6,5 - 9,0, dengan kisaran optimal 7,5 - 8,7.

Zat toksik lain bagi kehidupan biota air yaitu amonia tak terionisasi. Konsentrasi amonia bebas ini bergantung pada kondisi pH dan suhu badan air, sehingga peningkatan pH dan suhu menyebabkan proporsi amonia bebas di dalam air meningkat. Toksisitas amonia non-ionisasi berbahaya bagi organisme perairan, khususnya ikan. Hal ini dikarenakan konsentrasi NH_3 bebas yang tinggi dalam air dapat mengganggu fungsi kerja insang pada ikan, meningkatkan konsentrasi amonia dalam darah dan jaringan tubuh ikan, sehingga dapat melemahkan kemampuan darah dalam mengangkut oksigen dan mengganggu stabilitas membran sel.

Nitrit adalah bagian dari senyawa nitrogen yang berkaitan terhadap keberadaan amonia. Konsentrasi nitrit di perairan menunjukkan proses biodegradasi yang berkelanjutan, serta penguraian

bahan organik dengan oksigen terlarut rendah. Nitrit merupakan zat toksik bagi biota perairan. Sifat toksiknya karena dapat bereaksi dengan hemoglobin dalam darah sehingga membuat darah tidak mampu mengangkut oksigen. Selain nitrit terdapat juga nitrat (NO_3^-) yang bersifat toksik. Keberadaan amonia, nitrit, dan nitrat dalam perairan merupakan satu kesatuan. Senyawa ini saling berkaitan karena proses oksidasi maupun reduksi. Aktivitas mikroba di tanah atau air menguraikan limbah organik yang mengandung nitrogen menjadi amonia, selanjutnya dengan proses oksidasi amonia menjadi nitrit, kemudian teroksidasi kembali menjadi nitrat. Proses ini dipengaruhi oleh adanya oksigen. Namun apabila oksigen turun, maka akan terjadi proses kembali dari nitrat menjadi nitrit dan menjadi amonia kembali.

Prose pengubahan amonia menjadi nitrit dan nitrat disebut proses nitrifikasi, sebaliknya proses pengubahan nitrat menjadi nitrit dan amonia disebut dengan proses denitrifikasi. Meskipun kadar nitrit yang tinggi tidak seberacun amonium, namun dapat menyebabkan kematian. Hal ini karena nitrit tingkat tinggi dapat melewati insang dan masuk ke aliran darah melalui transpor aktif, di mana mereka dapat mengoksidasi hemoglobin normal menjadi methemoglobin. Berikut reaksinya:



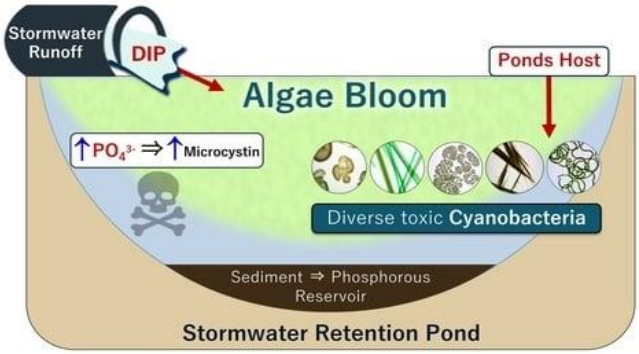
Gambar 3.3 Reaksi hemoglobin menjadi methemoglobin

Pada umumnya hemoglobin dalam darah mengikat oksigen dari insang dan mengangkutnya ke jaringan tubuh, selanjutnya oksigen diubah menjadi karbon dioksida, sedangkan keberadaan nitrit mengubah

hemoglobin menjadi methemoglobin yang tidak dapat mengangkut oksigen, sehingga ikan akan kesulitan bernafas dan menyebabkan stres pada ikan.

Pada perairan yang belum tercemar kandungan nitrat akan lebih besar daripada amonium. Perairan alami mengandung nitrat tidak pernah melebihi 0,1 mg/l. Namun kandungan nitrat dapat melebihi apabila tingkat pencemaran semakin besar. Indikasi tingginya kandungan nitrat di perairan apabila telah terjadi eutrofikasi yaitu pertumbuhan fitoplankton dan alga secara cepat. Terjadinya pencemaran antropogenik dapat digambarkan bila kandungan nitrat dalam air lebih dari 5 mg/l. Fosfat adalah zat pencemar yang mepunyai toksisitas hampir mirip dengan nitrat. Fosfat merupakan senyawa dengan kandungan fosfor yang dapat berasal dari batuan atau sedimen. Fosfor mempunyai fungsi dalam transfer energi di dalam sel. Sebagai contoh adanya ATP (adenosin trifosfat) dan ADP (adenosin difosfat). Fosfat di perairan berbentuk sebagai ion fosfat. Ion fosfat diperlukan dalam fotosintesis dan proses lain pada tumbuhan (dalam bentuk ATP, ADP dan nukleotida koenzim). Penyerapan fosfat dapat terus berlanjut meskipun dalam keadaan gelap. Ortofosfat (H_3PO_4) adalah bentuk fosfat anorganik yang paling umum dalam siklus fosfat. Distribusi berbagai bentuk fosfat dalam air laut dipengaruhi oleh proses biologis dan fisik. Fitoplankton mengangkut fosfat di permukaan air selama fotosintesis. Konsentrasi fosfat di atas 0,3 μm mempercepat pertumbuhan banyak spesies fitoplankton. Jika konsentrasinya kurang dari 0,3 μm, bagian sel yang sesuai akan tersumbat dan lebih sedikit fosfat seluler yang terbentuk.

Pada air laut normal, rasio N/P adalah 15:1. Peningkatan rasio N/P dapat menyebabkan pertumbuhan perairan atau eutrofikasi, dimana fitoplankton tumbuh tanpa terkendali. Eutrofikasi dapat memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, karena jumlah oksigen terlarut berkurang sehingga menyebabkan kematian organisme perairan lainnya (penyumbatan) dan keracunan oleh racun yang dihasilkan oleh fitoplankton (*dinoflagellata* dan *cyanobacteria*). Berikut adalah gambar mekanisme eutrofikasi perairan akibat pencemaran posfat.



Gambar 3.4 *Blooming Algae (*Sumber: Grogan *et al*., 2023)

B. Dampak Terhadap Kualitas Air Tanah

Pencemaran tanah dapat mempengaruhi kualitas air tanah. Memburuknya kualitas air tanah dapat mempengaruhi kesehatan manusia, kualitas lingkungan dan pembangunan sosial-ekonomi. Sebab, sebagian besar masyarakat memanfaatkan air tanah untuk kebutuhan sehari-hari. Salah satu dampaknya adalah polusi yang menyebabkan tingginya kadar fluorida, nitrat, logam, dan polutan organik persisten yang mengancam kesehatan masyarakat. Air tanah yang terkontaminasi dicirikan oleh fakta bahwa air tersebut mengandung zat terlarut atau sedimen. Hal ini dapat menyebabkan air berbau, berwarna dan berasa. Hal ini disebabkan karena keasaman air menjadi asam atau basa. Sampah yang mencemari tanah meningkatkan jumlah mikroorganisme yang menguraikannya. Hal ini mengurangi pasokan oksigen di dalam air ketika mikroorganisme tersebut menggunakannya. Jika hal ini terjadi, makhluk hidup tidak mempunyai oksigen sehingga menyebabkan ekosistem menjadi tidak seimbang.

C. Dampak Terhadap Kesehatan

Pencemaran air tentu akan berdampak terhadap kesehatan manusia. Air sebagai pelarut universal membawa zat toksik dalam air. Air yang telah tercemar ketika digunakan akan membawa sumber penyakit yang berdampak terhadap kesehatan manusia. Air merupakan komponen penting bagi kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lainnya. Oleh karena itu, kualitas air yang baik perlu untuk dijaga.

Sumber pencemaran air seperti dijelaskan di atas mayoritas disebabkan oleh aktivitas manusia itu sendiri. Sebagai contoh membuang limbah dan sampah langsung ke badan perairan. Kegiatan industri yang menghasilkan limbah dan tidak diolah namun langsung dibuang ke perairan. Semua ini seperti bom waktu yang tanpa disadari mengundang dampak bagi manusia itu sendiri, khusunya yang tinggal di sekitar air yang telah tercemar. Beberapa dampak zat toksik terhadap kesehatan adalah penyekit akibat mikroorganisme seperti kolera. Kolera adalah penyakit yang disebabkan oleh bakteri *Vibrio cholerae*. Infeksi dari bakteri tersebut berasal dari air atau makanan yang terkontaminasi kotoran orang yang menderita penyakit ini. Gejala yang ditimbulkan dari penyakit ini adalah diare, kram perut, muntah, dan sakit kepala.

Penyakit lainnya dari air yang tercemar adalah disentri. Disentri dapat terjadi akibat mengkonsumsi makanan atau air yang mengandung bakteri penyakit ini. Gejala penyakit ini seperti demam, muntah, sakit perut, dan diare. Penyakit lainnya adalah hepatitis A yang disebabkan oleh virus yang menyerang hati. Penyakit ini biasanya menular melalui makanan yang terkontaminasi air atau feses, atau melalui kontak langsung dengan feses penderita hepatitis A. Biasanya ini dapat teinfeksi dari air tanah yang dekat dengan pembuangan kotoran penderi hepatitis A. Selanjutnya dampak kesehatan akibat paparan logam berat. Sebagai contoh logam berat timbal adalah yang sering ditemukan sebagai pencemar perairan. Paparan timbal yang berlebihan dapat menyebabkan penyakit serius seperti kerusakan organ, gangguan sistem saraf, dan penyakit ginjal. Masih banyak lagi beberapa penyakit yang disebabkan akibat pencemaran air oleh zat toksik. Dampak kesehatan yang dirasakan manusia dapat terjadi langsung maupu tak langsung. Semuanya dipengaruhi oleh ketahanan manusia, jumlah zat toksik, serta tingkat pencemaran perairan. Meskipun demikian, pencemaran zat toksik terhadap perairan perlu diantisipasi mulai dari kesadaran manusia itu sendiri.

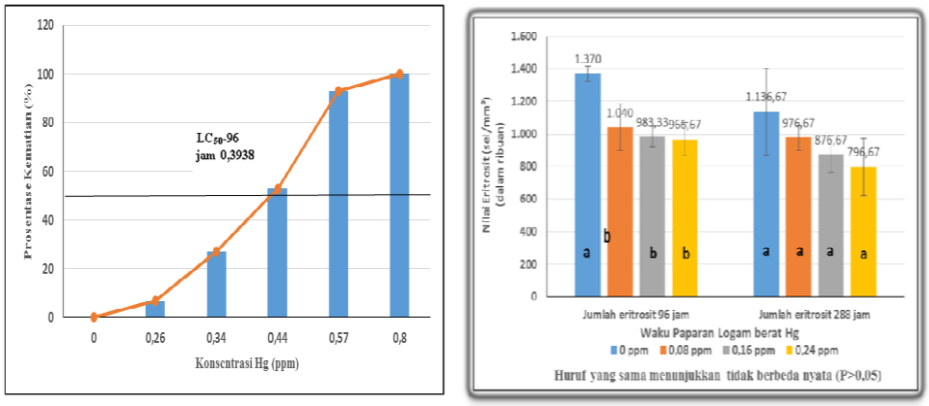
3.3 Uji Toksisitas

Setiap zat toksik memberikan pengaruh terhadap makhluk hidup berbeda-beda satu sama lain. Pengujian ini dapat dilakukan dengfan uji

toksisitas. Uji ini perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa besar efek toksikan yang diberikan dari zat toksik terhadao biota uji. Uji toksisitas adalah pengujian kemampuan suatu zat toksik dalam menimbulkan kerusakan bila masuk ke dalam tubuh, serta letak organ yang sensitif terhadapnya. Pengujian toksisitas merupakan cara yang cukup representatif untuk menilai tingkat bahaya yang ditimbulkan oleh air lindi. Uji toksisitas ini menggambarkan pengaruh suatu zat terhadap organisme tertentu. Uji toksisitas digunakan untuk memperoleh data kualitatif dan kuantitatif mengenai efek buruk (berbahaya) suatu zat toksik terhadap organisme akuatik. Uji toksisitas dapat digunakan untuk menilai potensi kerusakan pada lingkungan perairan dan untuk membuat database yang dapat digunakan untuk menilai risiko yang terkait dengan situasi beracun tertentu. Uji toksisitas air dapat dilakukan di lokasi atau di laboratorium. Uji lapangan biasanya menunjukkan paparan terhadap beberapa spesies, namun satu spesies mungkin dibatasi pada jangka waktu tertentu, dan uji laboratorium biasanya menunjukkan paparan terhadap satu spesies. Hubungan dosis-respons paling sering digunakan dengan kurva sigmoid untuk mengukur efek toksik pada kriteria hasil atau efek yang dipilih (persentase kematian atau efek merugikan lainnya pada organisme). Konsentrasi berada pada sumbu x dan persen penghambatan atau respon berada pada sumbu y.

Ada dua jenis uji toksisitas utama yaitu akut dan kronis. Uji toksisitas akut melihat efeknya terhadap suatu organisme selama paparan yang relatif singkat selama siklus hidup organisme tersebut. Konsentrasi yang digunakan dalam uji toksisitas atau lethalitas akut merupakan hasil perhitungan logaritma uji pendahuluan. Dihitung berdasarkan hasil tes awal. Uji toksisitas akut ini biasanya memakan waktu 24 hingga 96 jam. Dalam pengujian toksisitas akut, angka kematian adalah titik akhir yang paling umum diukur, dan hasilnya biasanya dilaporkan sebagai persen angka kematian pada konsentrasi tertentu atau sebagai LC50. Konsentrasi mematikan 50 (LC 50) adalah konsentrasi zat dalam air yang menyebabkan kematian sekitar 50% populasi organisme yang diuji. Sebelum melakukan uji toksisitas yang mematikan, dilakukan uji pendahuluan untuk menentukan rentang konsentrasi yang sesuai, yaitu konsentrasi yang tidak terlalu rendah atau konsentrasi yang tidak

terlalu tinggi. Berikut adalah contoh uji toksistas berdasarkan hasil penelitian. Berdasarkan hasil perhitungan pendahuluan, diperoleh beberapa konsentrasi LC50-96 untuk uji toksisitas akut 1 jam, yaitu 0 ppm, 0,26 ppm, 0,34 ppm, 0,44 ppm, 0,57 ppm, dan 0,80 ppm. Hasil uji toksisitas logam berat Hg sebagai zat toksik uji toksisitas akut atau letal pada ikan dianalisis menggunakan analisis probit dan nilai LC50 96 jam sebesar 0,3938 ppm. Artinya pada konsentrasi 0,3938 ppm, logam berat Hg menyebabkan kematian 50% ikan dalam waktu 96 jam setelah paparan terhadap jumlah total organisme uji yang digunakan. Semakin rendah nilai LC50-96 jam, semakin besar toksisitas bahan beracun tersebut. Jika nilai LC50-96 per jam 1-10 ppm maka zat toksik tersebut tergolong sangat toksik. Pada penelitian ini logam berat Hg tergolong sangat toksik karena nilai LC50-96 Hg < 1 ppm yaitu 0,3938 ppm. Berikut adalah tampilan grafis hasil uji toksisitas.



Gambar 3.5 Uji Toksisitas, (kiri) akut; (kanan) kronis

Sumber: Prayogo *et al*., 2016

Uji toksisitas kronis memberikan gambaran efek toksikan jangka panjang yang berkaitan dengan sistem kerja metabolisme, pertumbuhan, sistem reproduksi atau kelangsungan hidup organisme uji. Uji toksisitas kronis ini umumnya lebih sensitif dibandingkan uji toksisitas akut. Misalnya pada percobaan ini uji toksisitas kronik atau subletal dilakukan setelah nilai LC50-96 jam diketahui. Tujuan uji toksisitas ini adalah untuk mengetahui pengaruh toksikan logam berat Hg terhadap jumlah eritrosit

dan nilai hematokrit ikan nilem. Pemilihan ini didasarkan pada jumlah eritrosit dan hematokrit adalah sistem yang sensitif terhadap zat toksikan. Zat toksikan yang masuk dianggap sebagai benda asing yang secara alami sel darah akan meningkat untuk menghilangkannya. Oleh karena itu pengamatannya pun memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan uji toksisitas akut yang melihat jumlah kematian pada waktu tertentu.

Bab 4

MANAJEMEN POLUSI UDARA DAN PENCEMARAN TANAH

Pencemaran udara merujuk pada penetrasi atau penambahan zat, energi, atau elemen lain ke udara yang biasanya disebabkan oleh aktivitas manusia. Hal ini menyebabkan penurunan kualitas udara hingga titik di mana kemampuannya untuk memenuhi fungsi-fungsi tertentu terganggu. Polusi udara adalah salah satu risiko lingkungan terbesar terhadap kesehatan. Dengan mengurangi tingkat polusi udara, suatu negara dapat mengurangi beban penyakit seperti stroke, penyakit jantung, kanker paru-paru, dan penyakit pernafasan kronis dan akut, termasuk asma. Pada tahun 2019, 99% populasi dunia tinggal di tempat yang tidak memenuhi pedoman kualitas udara WHO.

Gambar 4.1. Polusi udara Jakarta
(Sumber: https://www.cnbcindonesia.com)

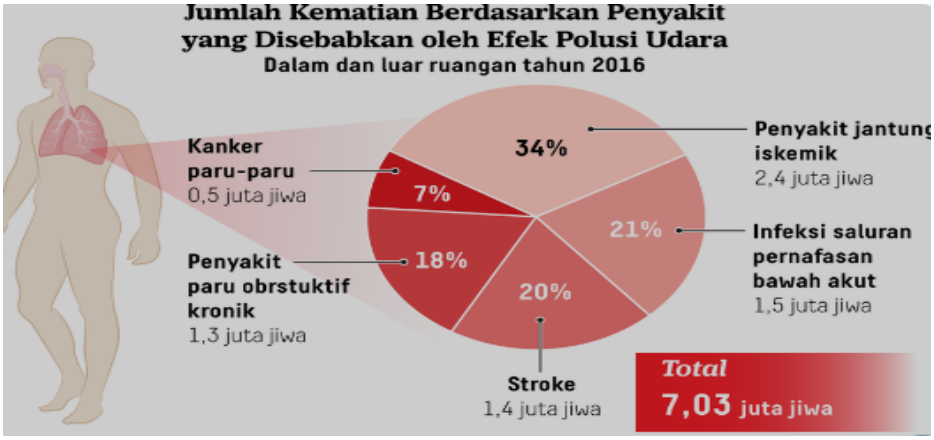
Polusi udara adalah ancaman lingkungan terbesar terhadap kesehatan dan kesejahteraan dalam skala global, dan semua populasi terkena dampak yang berbeda-beda luasnya. Polusi udara terdiri dari

campuran zat-zat di dalamnya atmosfer yang dapat menimbulkan kerugian bagi manusia, makhluk hidup lainnya dan lingkungan, termasuk pada konsentrasi rendah. Sangat memprihatinkan adalah polusi udara yang terbesar adalah berasal dari pembakaran bahan bakar fosil dan biomassa semakin banyak bukti yang menunjukkan bahwa polusi udara bertanggung jawab atas berbagai hasil kesehatan yang merugikan, mempengaruhi banyak organ dan system tubuh manusia. Selain itu, beberapa polutan udara, seperti ozon di permukaan tanah (O3) dan karbon hitam, juga merupakan polutan iklim berumur pendek mempengaruhi sistem iklim.

4.1 Paparan Polusi Udara

Polusi udara luar ruangan merupakan masalah kesehatan lingkungan utama yang mempengaruhi semua orang di negara-negara dengan peringkat rendah, menengah, dan tinggi. Polusi udara ambien (luar ruangan) di perkotaan dan pedesaan diperkirakan menyebabkan 4,2 juta kematian dini di seluruh dunia per tahun pada tahun 2019; Kematian ini disebabkan oleh paparan partikel halus, yang menyebabkan penyakit kardiovaskular dan pernapasan, serta kanker. Pemerintah biasanya melacak tingkat polutan udara dan memperkirakannya paparan dengan menyebarkan jaringan stasiun pemantauan lokasi tetap Namun, banyak yurisdiksi yang tidak memiliki hal tersebut secara kapasitas, dan sistem yang ada sering kali hanya melacak jumlah yang terbatas polutan, seperti materi partikulat (PM). Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNEP), dibuat untuk menjembatani kesenjangan ini dan meningkatkan kesadaran mengenai polusi udara, WHO mengumpulkan database global tentang pengukuran lingkungan dan rumah tangga. Di dalam khususnya, Database Kualitas Udara Ambien WHO mencakup data tahunan konsentrasi rata-rata PM dengan diameter ≤ 2,5 μm (PM2.5) dan ≤ 10 μm (PM10), serta nitrogen dioksida (NO_2), dari lebih dari 6000 pemukiman manusia di lebih dari 100 negara.

Berdasarkan data terkini, jumlah penduduknya hanya 10% saja pemukiman yang dinilai terkena tingkat rata-rata tahunan PM2.5 atau PM10 selaras dengan pedoman kualitas udara global WHO (WHO, 2021). Untuk NO_2, populasinya hanya 23 % dari pemukiman yang dinilai terpapar pada tingkat rata-rata tahunan yang selaras dengan pedoman.



Gambar 4.2. Penyakit akibat terpapar polusi udara (Kompas.id)

Paparan polusi udara ambien dalam jangka pendek dan jangka Panjang berkontribusi terhadap beban penyakit melalui peningkatan risiko kematian, tahun-tahun kehidupan yang hilang, dan tahun-tahun hidup dalam kecacatan. Menurut perkiraan studi Global Burden of Disease (GBD), sekitar 4,2 juta kematian disebabkan langsung oleh partikulat masalah polusi udara ambien yang lebih kecil dari 2,5 μm (PM2.5) pada tahun 2015. Bukti dampak paparan jangka pendek (dari satu jam hingga beberapa hari) terhadap polutan udara bersifat konklusif untuk semua penyebab, kematian pernafasan, dan kardiovaskular, dan juga untuk rawat inap di rumah sakit atau kunjungan unit gawat darurat (WHO|Pedoman kualitas udara - pembaruan global 2005," 2018). Sejumlah tinjauan sistematis terbaru dan meta-analisis telah menunjukkan efek PM tentang semua penyebab dan kematian yang disebabkan oleh penyebab tertentu.

WHO memperkirakan bahwa pada tahun 2019, sekitar 37% kematian dini terkait polusi udara luar ruangan disebabkan oleh penyakit jantung iskemik dan stroke, 18% dan 23% kematian disebabkan oleh penyakit paru obstruktif kronis dan infeksi saluran pernapasan akut bagian bawah, dan 11% kematian disebabkan oleh oleh kanker pada saluran pernapasan. Masyarakat yang tinggal di negara-negara berpendapatan rendah dan menengah mengalami beban polusi udara luar ruangan yang tidak proporsional, dimana 89% (dari 4,2 juta kematian dini) terjadi di negara-negara tersebut. Beban terbesar terdapat di wilayah

WHO di Asia Tenggara dan Pasifik Barat. Perkiraan beban terbaru mencerminkan peran penting polusi udara dalam penyakit kardiovaskular dan kematian.

1. Pedoman kualitas udara WHO

Udara ambien adalah udara bebas dipermukaan bumi pada lapisan troposfir yang berada di dalam wilayah yurisdiksi Republik Indonesia yang dibutuhkan dan mempengaruhi kesehatan manusia, makhluk hidup dan unsur lingkungan hidup lainnya. Emisi adalah zat, energi dan/atau komponen lain yang dihasilkan dari suatu kegiatan yang masuk dan/atau dimasukkannya ke dalam udara ambien yang mempunyai dan/atau tidak mempunyai dan/atau tidak mempunyai potensi sebagai unsur pencemar.

Tabel 4.1. Baku Mutu Udara Ambien Nasional

No .	Parameter	Waktu Pengukuran	Baku Mutu	Metode Analisis	Peralatan
1.	SO_2 (Sulfur Dioksida)	1 Jam 24 Jam 1 Thn	900 ug/Nm^3 365 ug/Nm^3 60 ug/Nm^3	Pararosanilin	Spektrofotometer
2.	CO (Karbon Monoksida)	1 Jam 24 Jam 1 Thn	30.000 ug/Nm^3 10.000 ug/Nm^3 -	NDIR	NDIR Analyzer
3.	NO_2 (Nitrogen Dioksida)	1 Jam 24 Jam 1 Thn	400 ug/Nm^3 150 ug/Nm^3 100 ug/Nm^3	Saltzman	Spektrofotometer
4.	O_3 (Oksidan)	1 Jam 1 Thn	235 ug/Nm^3 50 ug/Nm^3	Chemiluminescent	Spektrofotometer
5.	HC (Hidro Karbon)	3 Jam	160 ug/Nm^3	Flame Ionization	Gas Chromatogarfi
6.	PM_{10} (*) (Partikel<10 um)	24 Jam	150 ug/Nm^3	Gravimetric	Hi – Vol
	$PM_{2,5}$ (*) (Partikel<2,5um)	24 Jam 1 Thn	65 ug/Nm^3 15 ug/Nm^3	Gravimetric Gravimetric	Hi – Vol Hi – Vol
7.	TSP (Debu)	24 Jam 1 Thn	230 ug/Nm^3 90 ug/Nm^3	Gravimetric	Hi – Vol
8.	Pb (Timah Hitam)	24 Jam 1 Thn	2 ug/Nm^3 1 ug/Nm^3	Gravimetric Ekstraktif Pengabuan	Hi – Vol AAS
9 .	Dustfall (Debu Jatuh)	30 hari	10 Ton/km^2/Bulan (Pemukiman) 20 Ton/km^2/Bulan (Industri)	Gravimetric	Cannister

Sejak tahun 1980an, WHO telah menghasilkan beberapa volume kualitas udara pedoman, baik untuk udara ambien dan dalam ruangan. Meskipun pendekatan untuk pengembangannya telah berkembang seiring berjalannya waktu, demikianlah pedoman kualitas udara WHO secara luas dipandang sebagai referensi global untuk melindungi kesehatan manusia dari dampak polusi udara (Kantor Regional WHO untuk Eropa, 2017). Secara khusus, pedoman kualitas udara WHO, pembaruan global tahun 2005 diameter di bawah 10 dan 2,5 μm (PM10 dan PM2.5), ozon (O_3), sulfur dioksida (SO_2), Nitrogen dioksida (NO_2), dan karbon monoksida (CO), udara standar mutu termasuk ambang batas aman telah ditetapkan.

4.2 Materi pencemar Udara

a. Materi partikulat (PM)

PM adalah indikator proksi umum untuk polusi udara. Terdapat bukti kuat mengenai dampak negatif terhadap kesehatan yang terkait dengan paparan polutan ini. Komponen utama PM adalah sulfat, nitrat, amonia, natrium klorida, karbon hitam, debu mineral, dan air. Sumber partikel terbesar yang disebut partikel kasar (partikel dengan diameter antara 2,5 μm (PM 2,5) dan 10 μm (PM 10) sebagian besar terdiri dari serbuk sari, semprotan air laut, dan debu yang tertiup angin dari erosi, ruang pertanian, jalan raya, dan operasi penambangan. Partikel yang lebih halus (yaitu PM2.5) dapat berasal dari sumber primer (misalnya pembakaran bahan bakar di fasilitas pembangkit listrik, industri atau kendaraan) dan sumber sekunder (misalnya reaksi kimia antar gas). Sumber terbesar partikel di sekitar rumah umumnya berasal dari pembakaran bahan bakar yang menimbulkan polusi di perapian terbuka atau kompor atau pemanas ruangan yang ventilasinya buruk dan tidak efisien. Selain aktivitas rumah tangga seperti memasak, memanaskan ruangan, dan penerangan, aktivitas lain dapat menjadi sumber penting pencemaran partikel di lingkungan rumah, seperti menyiapkan pakan ternak, memanaskan air untuk mandi, dan menyeduh minuman.

b. Karbon monoksida (CO)

Karbon monoksida adalah gas beracun yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak berasa yang dihasilkan oleh pembakaran tidak

sempurna bahan bakar karbon seperti kayu, bensin, arang, gas alam dan minyak tanah.

c. Ozon (O3)

Ozon di permukaan tanah – jangan sampai tertukar dengan lapisan ozon di bagian atas atmosfer – merupakan salah satu unsur utama kabut fotokimia dan terbentuk melalui reaksi dengan gas dengan adanya sinar matahari.

- **Nitrogen dioksida (NO_2)**

NO_2 merupakan gas yang biasa dihasilkan dari pembakaran bahan bakar di sektor transportasi dan industri. Nitrogen dioksida (NO_2) adalah gas berwarna coklat kemerahan yang larut dalam air, dan merupakan oksidan kuat. Sumber NO_2 di lingkungan dihasilkan dari pembakaran bahan bakar bersuhu tinggi dalam proses seperti yang digunakan untuk pemanasan, transportasi, industri, dan pembangkit listrik. Sumber nitrogen oksida (NOx) rumah tangga mencakup peralatan yang membakar bahan bakar seperti tungku, perapian, serta kompor dan oven gas. Paparan nitrogen dioksida dapat mengiritasi saluran pernafasan dan memperparah penyakit pernafasan. NO_2 merupakan prekursor ozon yang penting, polutan yang terkait erat dengan asma dan kondisi pernapasan lainnya.

- **Belerang dioksida (SO_2)**

SO_2 adalah gas tidak berwarna dengan bau yang tajam. Ini dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil (batubara dan minyak bumi) dan peleburan bijih mineral yang mengandung belerang. Di lingkungan luar ruangan, sumber utama bersifat spesifik lokasi dan dapat terdiri dari berbagai asal yang berbeda namun biasanya mencakup lalu lintas dan transportasi, aktivitas industri, pembangkit listrik, lokasi konstruksi, pembakaran limbah, kebakaran, atau ladang.

Risiko kesehatan yang terkait dengan partikel dengan diameter kurang dari 10 dan 2,5 mikron (PM10 dan PM2.5) telah terdokumentasi dengan baik. PM mampu menembus jauh ke dalam paru-paru dan masuk ke aliran darah sehingga menyebabkan dampak kardiovaskular (penyakit jantung iskemik), serebrovaskular (stroke), dan pernafasan.

Paparan materi partikulat dalam jangka panjang dan jangka pendek dikaitkan dengan morbiditas dan mortalitas akibat penyakit kardiovaskular dan pernapasan. Paparan jangka panjang telah dikaitkan dengan dampak buruk pada masa perinatal dan kanker paru-paru. Pada tahun 2013, penyakit ini diklasifikasikan sebagai penyebab kanker paru-paru oleh Badan Internasional untuk Penelitian Kanker (IARC) WHO. Ini juga merupakan indikator yang paling banyak digunakan untuk menilai dampak kesehatan dari paparan polusi udara.

4.3 Pengendalian Pencemaran Udara

Bulan Mei 2015, 194 Negara Anggota WHO mendukung resolusi Kesehatan dan lingkungan: mengatasi dampak polusi udara terhadap kesehatan. Dokumen tersebut menyatakan perlunya mengintensifkan upaya Anggota Negara dan WHO untuk melindungi populasi dari risiko kesehatan udara polusi. Menanggapi resolusi tersebut dan peta jalan berikutnya, WHO Global pertama Konferensi tentang Polusi Udara dan Kesehatan berlangsung pada bulan Oktober 2018. Peserta konferensi menyadari perlunya mengatasi polusi udara, dan menetapkan tujuan aspirasional untuk mengurangi dua pertiga kematian yang disebabkan oleh hal tersebut 2030. Hal serupa juga dilakukan oleh Majelis Lingkungan Hidup Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNEA). mengadopsi tiga resolusi mengenai topik ini dalam beberapa tahun terakhir, menyoroti dampak kesehatan dari segala bentuk polusi udara, termasuk debu dan badai pasir, serta pentingnya tindakan lintas sektoral dan kerja sama internasional.

Pertemuan Tingkat Tinggi Ketiga Majelis Umum PBB tentang Pencegahan dan Pengendalian Penyakit Tidak Menular (PTM) secara eksplisit mengakui paparan polusi udara sebagai salah satu dari lima faktor risiko utama PTM, di samping kurangnya aktivitas fisik, pola makan yang buruk, konsumsi alcohol dan penggunaan tembakau (UNGA, 2018). Laporan tahun 2019 dari PBB Khusus Pelapor tentang masalah kewajiban hak asasi manusia yang berkaitan dengan penikmatan lingkungan yang aman, bersih, sehat dan berkelanjutan menekankan kewajiban Negara-negara Anggota untuk menjamin hak semua orang, dalam hal ini kelompok rentan tertentu, untuk menghirup udara bersih

(UNGA, 2019).Efek gabungan dari polusi udara ambien dan polusi udara rumah tangga dikaitkan dengan 6,7 juta kematian dini setiap tahunnya.

Kebijakan dan investasi yang mendukung transportasi yang lebih bersih, perumahan yang hemat energi, pembangkit listrik, industri dan pengelolaan sampah kota yang lebih baik akan mengurangi sumber utama polusi udara luar ruangan. Akses terhadap energi rumah tangga yang bersih juga akan sangat mengurangi polusi udara di beberapa wilayah. Untuk mendukung pengurangan tingkat polusi udara dan untuk melindungi populasi dari risiko ganguan Kesehatan,maka Unit Kualitas Udara dan Kesehatan WHO bekerja di tiga bidang lintas sektoral:

1. Meningkatkan pengetahuan, bukti dan pengukuran kemajuan
2. Peningkatan kapasitas kelembagaan dan dukungan teknis
3. kepemimpinan dan koordinasi.

Berdasarkan Undang-undang Pengelolaan Lingkungan Hidup No. 14 tahun 1999, tujuan utama pengelolaan lingkungan adalah mencapai keselarasan antara manusia dan lingkungan, dengan memperhatikan kepentingan generasi sekarang dan masa depan serta mengatur penggunaan sumber daya alam secara bijaksana. Pengendalian pencemaran udara harus sesuai dengan tujuan tersebut, dengan mengarahkan kegiatan tersebut sesuai dengan hak, kewajiban, dan partisipasi masyarakat. Undang-undang tersebut juga menegaskan hak setiap individu untuk lingkungan yang sehat dan baik, yang juga diimbangi dengan kewajiban untuk merawat dan melestarikan lingkungan. Oleh karena itu, semua orang memiliki peran yang jelas dalam menjalankan hak dan kewajibannya terkait pengelolaan lingkungan. Peraturan pemerintah juga mengatur hak dan kewajiban bagi masyarakat dan pelaku usaha untuk menjaga dan melestarikan fungsi lingkungan hidup dalam setiap langkah kegiatannya.

4.4 ISO 14001 Tahun 2015: Standar Manajemen Lingkungan

ISO 14001 adalah standar internasional yang bertujuan untuk membantu organisasi dalam mengelola dampak negatif terhadap lingkungan melalui praktik operasional yang lebih berkelanjutan dan

ramah lingkungan. Standar ini fokus pada identifikasi, pengukuran, dan pengelolaan dampak lingkungan, serta meminimalkan mereka. ISO 14001 mendorong kepatuhan hukum, peningkatan kinerja lingkungan, dan keterlibatan stakeholder dalam upaya pelestarian lingkungan. Selain itu, penerapan standar ini membantu organisasi mematuhi regulasi lingkungan, mengurangi risiko hukuman atau tuntutan hukum. Dengan mengadopsi praktik ramah lingkungan, ISO 14001 mendorong inovasi untuk produk dan layanan yang lebih berkelanjutan, memperbaiki citra organisasi sebagai entitas yang peduli lingkungan, dan memperoleh kepercayaan dari pelanggan dan mitra bisnis. Dengan menerapkan ISO 14001, organisasi dapat mencapai keseimbangan antara pertumbuhan bisnis yang berkelanjutan dan pelestarian lingkungan, sesuai dengan meningkatnya kesadaran akan isu lingkungan.

ISO 14001 menganggap lingkungan udara sebagai bagian penting dari manajemen lingkungan. Organisasi diwajibkan untuk memonitor emisi dari kegiatan operasional mereka yang dapat mempengaruhi kualitas udara, seperti gas buang dari proses produksi atau armada kendaraan perusahaan. Standar ini mendorong organisasi untuk mengidentifikasi sumber polusi udara dan mengembangkan pengendalian yang efisien untuk mengurangi emisi ke atmosfer. Selain itu, standar ini menekankan pentingnya kepatuhan terhadap regulasi dan standar lingkungan, memberikan pelatihan kepada karyawan untuk meningkatkan kesadaran mereka, serta mendorong peningkatan berkelanjutan dalam praktik bisnis. Fokus pada lingkungan udara dalam ISO 14001 mencerminkan perannya yang krusial dalam menjaga keberlanjutan lingkungan global. Dengan menerapkan standar ini, organisasi dapat berperan aktif dalam menjaga kualitas udara yang sehat dan berkelanjutan bagi masyarakat secara keseluruhan.

4.5 Kebijakan mengurangi polusi udara

Mengatasi polusi udara, yang merupakan faktor risiko penyakit tidak menular tertinggi kedua, adalah kunci untuk melindungi kesehatan masyarakat. Sebagian besar sumber polusi udara luar ruangan berada di luar kendali individu dan hal ini memerlukan tindakan bersama dari para pembuat kebijakan di tingkat lokal, nasional dan regional yang bekerja di

sektor-sektor seperti energi, transportasi, pengelolaan limbah, perencanaan kota dan pertanian.

Ada banyak contoh kebijakan yang berhasil mengurangi polusi udara seperti

a) untuk industri: teknologi bersih yang mengurangi emisi cerobong asap industri; peningkatan pengelolaan limbah perkotaan dan pertanian, termasuk penangkapan gas metana yang dikeluarkan dari lokasi limbah sebagai alternatif pembakaran (untuk digunakan sebagai biogas)
b) untuk energi: memastikan akses terhadap solusi energi rumah tangga bersih yang terjangkau untuk memasak, pemanas dan penerangan
c) untuk transportasi: beralih ke moda pembangkit listrik yang ramah lingkungan; memprioritaskan angkutan cepat perkotaan, jaringan jalan kaki dan bersepeda di kota-kota serta angkutan barang dan penumpang antar kota
d) beralih ke kendaraan diesel tugas berat yang lebih bersih serta kendaraan dan bahan bakar rendah emisi, termasuk bahan bakar dengan kandungan sulfur yang lebih rendah
e) untuk perencanaan kota: meningkatkan efisiensi energi bangunan dan menjadikan kota lebih hijau dan kompak, sehingga hemat energi
f) untuk pembangkit listrik: peningkatan penggunaan bahan bakar rendah emisi dan sumber energi terbarukan yang bebas pembakaran (seperti tenaga surya, angin, atau air); pembangkitan panas dan listrik secara bersama-sama; dan pembangkitan energi terdistribusi (misalnya jaringan kecil dan pembangkit listrik tenaga surya di atap)
g) untuk pengelolaan limbah kota dan pertanian: strategi pengurangan limbah, pemisahan limbah, daur ulang dan penggunaan kembali atau pemrosesan ulang limbah, serta peningkatan metode pengelolaan limbah biologis seperti pencernaan limbah anaerobik untuk menghasilkan biogas, merupakan alternatif yang layak dan berbiaya rendah dibandingkan dengan sistem terbuka. pembakaran limbah padat – jika pembakaran tidak dapat dihindari, maka teknologi

pembakaran dengan pengendalian emisi yang ketat sangatlah penting

h) untuk kegiatan layanan kesehatan: menempatkan layanan kesehatan pada jalur pembangunan rendah karbon dapat mendukung pemberian layanan yang lebih berketahanan dan hemat biaya, serta mengurangi risiko kesehatan lingkungan bagi pasien, petugas kesehatan, dan masyarakat. Dalam mendukung kebijakan ramah iklim, sektor kesehatan dapat menunjukkan kepemimpinan publik sekaligus meningkatkan pemberian layanan Kesehatan

Tantangan dan Hambatan dan Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan

Tantangan lingkungan yang dihadapi manusia pada saat ini sangat kompleks dan memerlukan pendekatan yang komprehensif untuk mengatasi dampaknya. Salah satu tantangan utama adalah perubahan iklim yang disebabkan oleh emisi gas rumah kaca. Hal ini dapat diatasi dengan menerapkan kebijakan pengurangan emisi, meningkatkan efisiensi energi, dan beralih ke sumber energi terbarukan. Namun, untuk mencapai hal ini, diperlukan dukungan politik yang kuat dan kerjasama internasional. Selain itu, kehancuran habitat juga merupakan ancaman serius terhadap keanekaragaman hayati dan layanan ekosistem. Penanganannya memerlukan pengelolaan hutan yang berkelanjutan, konservasi lahan, dan restorasi habitat. Hal ini juga membutuhkan kerja sama antara pemerintah, masyarakat, dan lembaga internasional.

Polusi lingkungan, baik itu udara, air, atau tanah, juga perlu ditangani secara serius. Penerapan teknologi bersih, regulasi ketat, dan kesadaran masyarakat adalah kunci untuk mengurangi polusi ini dan melindungi kesehatan manusia dan lingkungan. Keterbatasan sumber daya alam juga merupakan masalah yang perlu diatasi. Peningkatan konsumsi sumber daya melebihi kapasitas regenerasi alam, sehingga diperlukan penggunaan yang lebih efisien, daur ulang, dan kebijakan pengelolaan yang berkelanjutan. Ketidaksetaraan akses dan manfaat lingkungan juga harus diperhatikan. Banyak komunitas, terutama di negara berkembang, tidak memiliki akses yang sama terhadap sumber daya alam dan manfaat lingkungan. Oleh karena itu, pembangunan

inklusif yang memperhitungkan kebutuhan masyarakat lokal sangat penting. Kurangnya kesadaran dan pendidikan tentang isu lingkungan juga merupakan tantangan besar. Meningkatkan pendidikan dan kesadaran masyarakat adalah kunci untuk mempromosikan perilaku yang ramah lingkungan dan mendukung upaya pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan. Terakhir, ketidakstabilan politik dan konflik juga dapat menghambat upaya pengelolaan lingkungan. Oleh karena itu, kesejahteraan dan stabilitas politik menjadi prasyarat untuk implementasi kebijakan lingkungan yang efektif. Dengan demikian, mengatasi tantangan lingkungan memerlukan kolaborasi lintas sektor, tingkat kesadaran yang lebih tinggi, dan komitmen politik yang kuat dari seluruh dunia.

4.6 Pencemaran Tanah

Tanah adalah kulit bumi, mantel yang penuh dengan bekas luka, kerutan berusia ribuan tahun, dan kerusakan yang lebih baru yang disebabkan oleh manusia dan alam itu sendiri. Beberapa dari penyakit akibat tercemarnya tanah tidak dapat disembuhkan – seperti kepunahan spesies, sedangkan penyakit lainnya membahayakan kesehatan dan ketahanan pangan, yang semuanya mengancam kesejahteraan separuh umat manusia di dunia, seperti yang diperingatkan oleh Global Land Outlook (GLO2), Land Restoration for Recovery and Resilience, diterbitkan pada tahun 2022 oleh Konvensi PBB untuk Memerangi Desertifikasi. Laporan tersebut menyoroti bahwa polusi merupakan penyebab penyakit dan kematian terbesar di dunia saat ini, terutama polusi tanah, paparan bahan kimia, dan pengelolaan limbah yang buruk.

Pengelolaan polusi tanah melibatkan identifikasi sumber kontaminasi, evaluasi risiko terhadap kesehatan manusia dan lingkungan, serta penerapan tindakan remediasi untuk mengurangi atau menghilangkan kontaminan. Ini dapat melibatkan teknik-teknik seperti penyingkiran limbah, penyerapan atau degradasi zat beracun, restorasi habitat, dan penggunaan tanah alternatif. Pencegahan tetap menjadi pendekatan terbaik dalam mengatasi polusi tanah. Hal ini melibatkan pengurangan penggunaan bahan beracun, pengelolaan limbah yang aman, penggunaan teknologi bersih dalam industri, dan praktik

pertanian yang berkelanjutan. Kesadaran masyarakat tentang pentingnya menjaga kualitas tanah juga penting untuk mendorong perubahan perilaku yang lebih ramah lingkungan.

Kerusakan yang tidak terlihat ini muncul ketika konsentrasi polutan di permukaan menjadi sangat tinggi sehingga membahayakan keanekaragaman hayati daratan dan membahayakan kesehatan, khususnya melalui pangan. Kegiatan seperti peternakan dan peternakan intensif menggunakan bahan kimia, pestisida dan pupuk yang mencemari tanah, seperti yang terjadi pada logam berat dan bahan kimia alami dan buatan manusia lainnya.

Tabel 4.2 Daftar logam berat dan ambang batas lingkungannya

Nama Logam Berat	Ambang Batas (ppm)	
	Indonesia[1]	Kanada[2]
Plumbum (Pb)	0.07	100 ppm
Cadmium (Cd)	0,01	0,50
Cobalt (Co)	-	10
Cromium (Cr)	0,5	2,5
Nikel (Ni)	0,31	40
Cuprum (Cu)	0,04	60-125
Mangan (Mn)	0,15	1500
Zinkum (Zn)	0,06	70

.Ket : 1. Sumber : Badan Standarisasi Nasional SNI 2004
2. Sumber : University of Canada (1992)

Polusi tanah merupakan ancaman global yang sangat serius di kawasan seperti Eropa, Eurasia, Asia dan Afrika Utara, sebagaimana ditunjukkan oleh Organisasi Pangan dan Pertanian Perserikatan Bangsa-Bangsa (FAO). FAO juga menegaskan bahwa degradasi yang intens dan bahkan sedang telah mempengaruhi sepertiga tanah dunia. Selain itu, pemulihannya sangat lambat sehingga memerlukan waktu 1.000 tahun untuk menciptakan lapisan tanah subur yang hanya beberapa sentimeter saja.

4.7 Penyebab dan jenis pencemaran tanah

Fenomena seperti erosi, hilangnya karbon organik, peningkatan kandungan garam, pemadatan, pengasaman dan polusi kimia merupakan penyebab utama degradasi tanah saat ini. Penyebab utama pencemaran tanah bervariasi tergantung pada konteks lokal dan jenis aktivitas manusia yang terlibat. Limbah industri dan pertambangan sering mengandung bahan kimia beracun seperti logam berat dan pestisida. Pembuangan limbah ini secara tidak aman dapat menyebabkan kontaminasi tanah di sekitarnya. Dampaknya sangat merugikan, termasuk kerusakan lingkungan, risiko kesehatan masyarakat, dan kerugian ekonomi. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan limbah yang hati-hati dan berkelanjutan, termasuk pemrosesan limbah dengan teknologi yang tepat, penggunaan metode pembuangan yang aman, dan pemantauan terus-menerus terhadap kualitas tanah untuk mencegah kontaminasi lebih lanjut. Pembuangan limbah domestik dan industri yang tidak terkelola dengan baik dapat menyebabkan pencemaran tanah yang serius. Ketika limbah cair atau padat dibuang langsung ke tanah tanpa perlakuan yang tepat, ini dapat menghasilkan peningkatan konsentrasi zat beracun di dalam tanah. Akibatnya, kesuburan tanah terganggu dan kualitas tanah menjadi tidak cocok untuk pertanian atau penggunaan lainnya. Selain itu, pencemaran tanah juga dapat berdampak negatif pada ekosistem lokal dan menyebabkan masalah kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, pengelolaan limbah yang tepat dan pemantauan lingkungan yang ketat sangat penting untuk mencegah dampak buruk ini.

Pertanian intensif sering menggunakan pupuk dan pestisida secara berlebihan, yang dapat mengakibatkan akumulasi bahan kimia beracun di tanah. Praktik-praktik seperti pembakaran lahan dan deforestasi untuk perluasan pertanian juga berkontribusi pada degradasi tanah. Akibatnya, kesuburan tanah menurun dan kualitas tanah terganggu, menghambat pertumbuhan tanaman dan produktivitas pertanian. Selain itu, pencemaran tanah oleh bahan kimia beracun dapat berdampak negatif pada lingkungan dan kesehatan manusia melalui air dan tanaman yang terkontaminasi. Untuk mengatasi masalah ini, praktik pertanian berkelanjutan dan pengelolaan tanah yang bijaksana perlu

diprioritaskan. Kegiatan konstruksi dan pembangunan, termasuk pembangunan bangunan, jalan, dan infrastruktur, sering mengganggu lapisan tanah dan memicu erosi tanah yang signifikan. Pemadatan tanah dan pergeseran tanah selama proses konstruksi dapat merusak struktur tanah dan menurunkan kesuburan serta daya dukungnya. Selain itu, penggunaan bahan kimia dalam konstruksi seperti cat, semen, dan bahan bangunan lainnya juga berpotensi mencemari tanah jika tidak dikelola dengan baik. Akumulasi limbah konstruksi dan pembangunan juga dapat memperburuk masalah ini. Oleh karena itu, perencanaan yang cermat dan pengelolaan limbah yang efektif sangat penting dalam mengurangi dampak negatif kegiatan konstruksi terhadap tanah.

Kegiatan penyimpanan bahan berbahaya, seperti baterai, minyak pelumas, dan bahan kimia rumah tangga lainnya, jika tidak dilakukan dengan aman, dapat menyebabkan pencemaran tanah yang serius di sekitar lokasi penyimpanan tersebut. Limbah berbahaya yang dibuang secara tidak benar atau disimpan tanpa tindakan pencegahan yang memadai dapat merembes ke dalam tanah, mencemari tanah dan air tanah di sekitarnya. Dampaknya bisa sangat merugikan, termasuk kerusakan lingkungan, risiko kesehatan masyarakat, dan degradasi ekosistem. Oleh karena itu, manajemen limbah yang tepat dan tindakan pencegahan yang ketat diperlukan untuk mencegah pencemaran tanah akibat kegiatan penyimpanan bahan berbahaya. Kebakaran hutan dan pembakaran limbah merupakan sumber asap dan abu yang mengandung zat beracun. Saat abu tersebut jatuh ke tanah, mereka dapat mencemari dan merusak kualitas tanah. Zat-zat beracun yang terkandung dalam abu dapat mempengaruhi kesuburan tanah dan mengganggu ekosistem lokal. Pencemaran tanah ini juga dapat berdampak negatif pada pertumbuhan tanaman dan kehidupan mikroba tanah. Selain itu, tanah yang tercemar oleh abu kebakaran hutan dan limbah juga meningkatkan risiko kontaminasi air tanah, yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan secara keseluruhan. Oleh karena itu, pencegahan kebakaran hutan dan pembakaran limbah serta pemantauan lingkungan yang ketat sangat penting untuk melindungi tanah dari pencemaran.

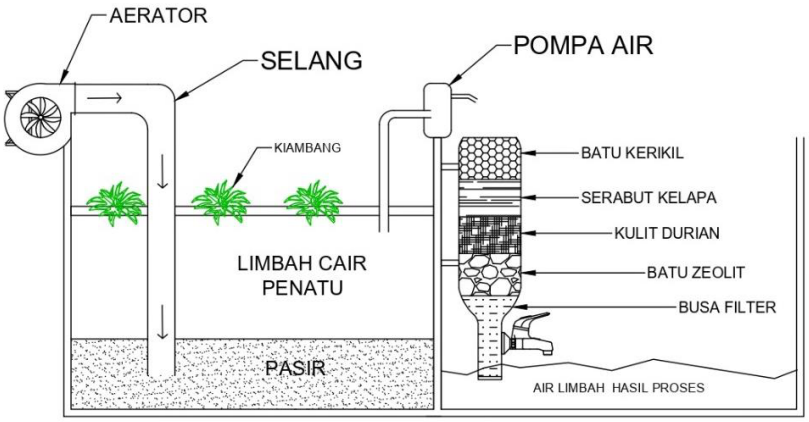
4.8 Remediasi Tanah terkontaminasi

Beberapa teknologi telah dikembangkan untuk remediasi tanah yg terkontaminasi. Beberapa strategi penting yang diikuti untuk dekontaminasi tanah yang tercemar tercantum di bawah ini:

- **Insitu** ; Pengendalian pencemaran di daerah terjadinya pencemaran, ada beberapa Teknik yang digunakan

  a. Bioventing

  Dilakukan penambahan udara dan hara melalui sumur ke dalam tanah yang terkontaminasi tujuannya untuk menstimulasi bakteri alami tempatan (indigeneous). Bioventing memberikan udara pada kecepatan aliran yang rendah dan hanya diperlukan oksigen dalam jumlah sedikit untuk biodegradasi sementara volatilisasi diminimumkan dan melepaskan kontaminan ke atmosfer.



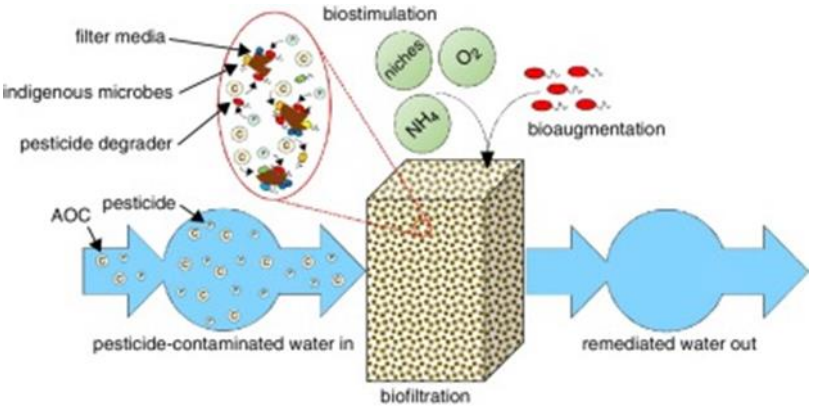
Gambar 4.3. Design Alat Bioventing sederhana
(Sumber : Budiharto dkk., 2023)

b. Biosparging

Injeksi udara ke air dalam tanah yang tujuannya untuk meningkatkan konsentrasi oksigen dan mempercepat laju degradasi kontaminan oleh mikroba/bakteri alami. Melalui biosparging akan meningkat kontak tanah dengan air dalam tanah. Cara yang paling murah dan mudah melaksanakan biosparging adalah dengan membuat instalasi pipa berdiameter kecil tempat menginjeksikan gas.

c. Biostumulasi

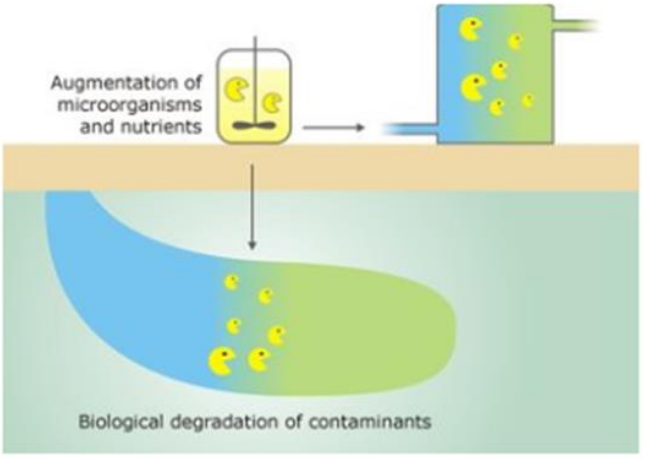
Penambahan hara seperti nitrogen dan fosfor bahkan adakalanya penambahan elemen mikro atau pemberian bahan untuk meningkatkan/menurunkan pH yang kesemuanya bertujuan menstimulasi populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah setempat.



Gambar 4.4. Proses kerja Biostimulasi
(Sumber : Hebling, 2015)

d. Bioaugmentation

- Menambahkan mikroorganisme alami tempatan (indigeneous) maupun enzim ke tempat terkontaminasi.



Gambar 4.5. Proses kerja Bioaugmentasi (Tideman & Keuning, 2024)

Tabel 4.3 Peranan mikroba tanah pada rehabilitasi laha bekas tambang

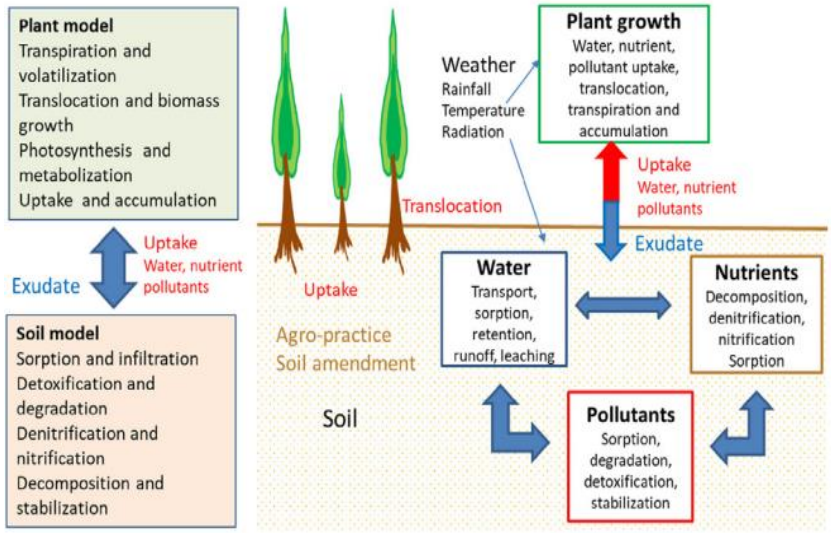
No.	Jenis mikroba (*Species of microbes*)	Peranan (*Roles*)	Dampak ekonomi (*Economic impact*)	Dampak ekologi (*Ecological impact*)
1.	*Thiobacillus ferrooxidans* *,**	AMD & *biominer*	*Recovery* logam naik	Lahan masam
2.	*T. thiooxidans* *, **	AMD & *biominer*	*Recovery* logam naik	Lahan masam
3.	*Leptospirillum* spp. *, **	AMD	Korosif besi & beton	Lahan masam
4.	*Ferroplasma acidarmanus* *, **	AMD	Korosif besi & beton	Lahan masam
5.	*Acidimicrobium* sp. **	*Biominer*	*Recovery* logam naik	Lahan masam
6.	*Ferromicrobium* sp. **	*Biominer*	*Recovery* logam naik	Lahan masam
7.	*Sulfobacillus* sp. **	*Biominer*	*Recovery* logam naik	Lahan masam
8.	*Sulfolobus* sp. **	*Biominer*	*Recovery* logam naik	Lahan masam
9.	*Acidianus* sp. **	*Biominer*	*Recovery* logam naik	Lahan masam
10.	*Metallospaera* sp. **	*Biominer*	*Recovery* logam naik	Lahan masam
11.	*Sulfurispaera* sp. **	*Biominer*	*Recovery* logam naik	Lahan masam
12.	*Pseudomonas putida* $	Bioremediasi sianida	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
13.	*P. pseudoalcaligenes* *	Bioremediasi merkuri	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
14.	*Geobacter metalireducens* $	Bioremediasi merkuri	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
15.	*Shewanella putrefaciens* $	Bioremediasi merkuri	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
16.	*Desulfovibrio vulgaris* $	Bioremediasi merkuri	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
17.	*D. desulfuricans* $	Bioremediasi merkuri	Detoksifikasi murah	Akumulasi turun
18.	*Desulfovibrio* spp. &	Bior. Fe, Mn, Zn, Cu	Detoksifikasi murah	AMD netral
19.	*Carnobacterium* spp. &	Bioremediasi Mn	Detoksifikasi murah	AMD netral
20.	*Glomus mosae* #	20-22 Membantu	20-25 Pemeliharaan	20-25 Meningkatkan
21.	*G. caledonicum* #	tanaman mengkelat	tanaman menjadi	keberhasilan
22.	*G. claroideum* #	Cu	lebih murah	revegetasi lahan
23.	*Rhizobium* sp. @,^	23-25 Membantu		
24.	*Bacillus* sp. ^	tanaman mengkelat		
25.	*Glomus* sp. ^	Mn, Zn, dan Cu		

Keterangan (*Remarks*):
*: Brierly & Brierly, 1999 *dalam* Santosa, 2004; **: Rawlings, 2004; $: Semple, 2003; &: Widyati *et al.*, 2008; #: Gonzalez-Chaves, 2002; @: Khan, 2000 *dalam* Widyati, 2006; ^: Widyati, 2006

- **Fitoremediasi**

  Fitoremediasi merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk membersihkan tanah yang terkontaminasi dengan menggunkan tumbuhan hiperakumulator, dan telah terbukti berhasil di banyak lokasi. Namun, karena interaksi mikroba tanaman-tanah yang kompleks, terdapat ketidakpastian dalam kinerja dan efisiensi teknik fitoremediasi ketika diperluas, sehingga menyebabkan kurangnya pemanfaatan secara global. Karena pembentukan tutupan vegetasi sangat bergantung pada air, nutrisi, cuaca, polutan, dan tanah, biaya dan efisiensi fitoremediasi sangat bervariasi di berbagai lokasi. Hal ini menjadi salah satu tantangan paling penting untuk meningkatkan penilaian biaya, efisiensi dan kinerja fitoremediasi Pemodelan fitoremediasi memainkan peran penting dalam menilai kinerja fitoremediasi yang efektif, namun

penerapan dan peningkatan ketidakpastian model fitoremediasi memerlukan tujuan yang jelas, dan metode yang layak, sehingga menghasilkan perbaikan dan konsekuensi yang nyata dan praktis. Mengatasi tantangan-tantangan ini akan berkontribusi pada peningkatan penilaian fitoremediasi dan jasa ekosistem, sehingga mendorong dan mendorong peningkatan dan pemanfaatan secara luas.



Gambar 4.6. Permodelan Fitoremediasi
(Wang dan Delavar, 2024)

Ex-situ: adalah Teknik remediasi dengan memindahkan senyawa kontaminan kemudian dibuat treatment. Dapat dilakukan dengan berbagai cara yaitu :

- Landfarming

  Aplikasi dan pencampuran kontaminan atau limbah ke permukaan tanah yang tidak terkontaminan. Daerah yang dipilih memiliki ciri tanah yang memiliki lapisan liat yang dapat menghalangi pencucian yang dapat menyebabkan pencemaran air minum/air dalam tanah. Tanah tersebut dilakukan plowing dan disking yang bertujuan untuk memecahkan bongkahan dan mencampur supaya seragam sehingga kondisi kelembaban dan aerasi menjadi baik. Selain itu, pengolahan

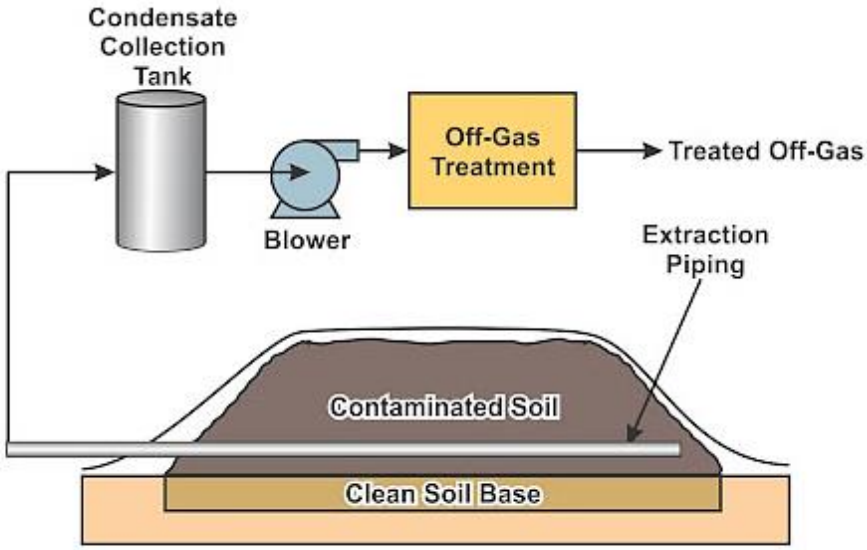
tanah (plowing dan disking) dapat mengakibatkan konsentrasi kontaminan menjadi lebih rendah.

- **Composting**

  Composting merupakan teknik dengan menggabungkan tanah terkontaminasi dengan bahan organik yang tidak berbahaya seperti kotoran hewan atau limbah pertanian. Kehadiran bahan organik ini akan mendukung perkembangan dari mikroorganisme dan menaikkan temperatur.

- **Biopiles**

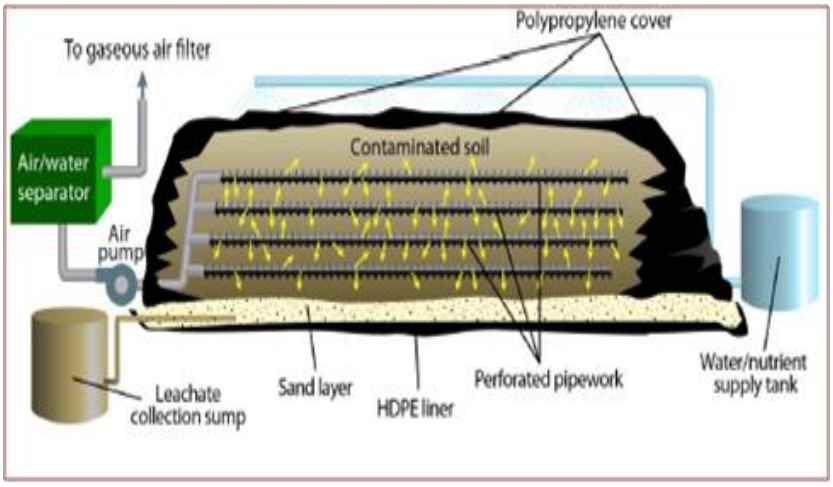
  Merupakan hybrid dari landfarming dan composting. Pile tempat melaksanakan bioremediasi didesain untuk melakukan pengomposan aerob. Biasanya biopile digunakan untuk mengatasi kontaminasi permukaan akibat hidrokarbon petroleum dan merupakan versi landfarming yang lebih modern yang bertujuan untuk mengontrol pencucian dan volatilisasi dari limbah. Biopiles menyediakan lingkungan yang sesuai untk mikroorganisme aerobik dan anaerobik yang indigenous.



Gambar 4.7. Proses kerja Biopiles (Patil, 2024)

- **Bioreactor**

  Reaktor slurry digunakan untuk memperlakukan tanah dan air terkontaminan. Bioremediation dalam reaktor melibatkan pemrosesan bahan terkontaminasi yang padat (tanah, sedimen, lumpur) atau air melalui sistem yang dibangun terkurung.



Gambar 4.8. Proses kerja bioreactor dalam meremediasi tanah tercemar (Sumber : Kumar dkk., 2021)

Bab 5

MANAJEMEN KONSERVASI SUMBER DAYA ALAM

5.1 Strategi dalam Konservasi Hutan

Hutan adalah salah satu kekayaan alam terpenting di Bumi. Mereka tidak hanya rumah bagi beragam spesies tumbuhan dan hewan, tetapi juga memberikan manfaat penting bagi manusia seperti oksigen, pengaturan iklim, mencegah erosi tanah, dan kayu yang berharga. Namun, konservasi hutan semakin menjadi isu besar karena tingkat deforestasi dan kerusakan hutan yang semakin tinggi, yang disebabkan oleh aktivitas manusia seperti pertanian, perambahan, dan penebangan ilegal. Jika tidak ada tindakan yang efektif untuk melindungi dan memperbaiki kondisi hutan, kita akan menghadapi ancaman serius bagi keanekaragaman hayati, ketahanan pangan, dan stabilitas iklim global.

Konservasi hutan memainkan peran penting dalam upaya untuk meredam dampak perubahan iklim, khususnya dalam hal menjaga kelestarian hutan tropis yang berfungsi sebagai penyerap karbon yang besar. Proses deforestasi yang meluas menghasilkan pelepasan karbon yang signifikan ke atmosfer, yang secara substansial berkontribusi terhadap pemanasan global. Selain itu, penting untuk diingat bahwa hutan-hutan juga memiliki peranan kunci dalam mengatur siklus hidrologi, mengurangi risiko bencana alam seperti banjir dan tanah longsor, serta menyediakan layanan ekosistem yang penting bagi kesejahteraan manusia dan kelestarian lingkungan. Oleh karena itu, usaha untuk melestarikan hutan tidak hanya mendesak untuk menjaga kelangsungan ekosistem, tetapi juga untuk memitigasi dampak negatif perubahan iklim yang semakin terasa.

5.1.1 Manfaat Hutan Bagi Kehidupan

Hutan merupakan salah satu aset alam yang paling berharga bagi kehidupan di Bumi. Selain menjadi tempat tinggal bagi berbagai spesies tumbuhan dan hewan, hutan juga memiliki peran yang sangat penting dalam menjaga keseimbangan ekologi, menyediakan sumber daya alam, dan mendukung kehidupan manusia secara langsung maupun tidak langsung. Berikut ini kita akan menguraikan beberapa manfaat utama hutan bagi kehidupan, didukung oleh temuan dari penelitian ilmiah terkini.

Gambar 5.1. Hutan Hujan Tropis di Kalimantan

(Sumber: https://nationalgeographic.grid.id/)

5.1.2 Menjaga Keseimbangan Lingkungan

Hutan-hutan tropis, seperti hutan hujan Amazon dan hutan tropis lainnya, menyimpan karbon dalam jumlah besar, yang membantu dalam mengurangi jumlah karbon dioksida di atmosfer dan mengurangi efek pemanasan global (Smith *et al.,* 2019). Sebagai tempat tinggal bagi sebagian besar keanekaragaman hayati di Bumi, hutan juga berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem global. Kehilangan hutan secara besar-besaran dapat menyebabkan kerusakan lingkungan yang serius, termasuk perubahan iklim yang lebih parah dan kehilangan keanekaragaman hayati yang tak tergantikan.

5.1.3 Keanekaragaman Hayati dan Konservasi

Keanekaragaman hayati yang terdapat di hutan juga memberikan manfaat yang besar bagi kehidupan. Berbagai spesies tumbuhan dan hewan yang hidup di hutan memberikan kontribusi penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan konservasi alam (Rahayu & Setiawan, 2020). Selain itu, banyak tanaman obat-obatan dan bahan pangan yang berasal dari hutan, yang telah digunakan oleh manusia selama ribuan tahun untuk pengobatan tradisional dan pemenuhan kebutuhan pangan.

5.1.4 Penyediaan Sumber Air Bersih

Hutan-hutan berperan sebagai penyedia air bersih bagi kehidupan manusia. Menurut penelitian oleh Li *et al.* (2021), vegetasi hutan memiliki peran penting dalam menjaga kualitas dan kuantitas air, serta mencegah erosi tanah. Air yang mengalir dari hutan tidak hanya mendukung kehidupan flora dan fauna di dalamnya, tetapi juga memenuhi kebutuhan air bagi masyarakat di sekitarnya, baik untuk konsumsi maupun pertanian.

5.1.5 Tempat Penelitian Ilmiah dan Sumber Obat-obatan

Hutan juga menjadi tempat penting untuk penelitian ilmiah dan pengembangan obat-obatan. Menurut studi oleh Kumar *et al.* (2019), banyak tumbuhan obat yang ditemukan di hutan memiliki potensi untuk pengembangan obat-obatan baru yang dapat membantu dalam mengobati berbagai penyakit. Penggalian pengetahuan baru dari keanekaragaman hayati hutan juga dapat memberikan wawasan yang berharga dalam berbagai bidang ilmu pengetahuan, termasuk biologi, kimia, dan kedokteran.

5.1.6 Mendukung Mata Pencaharian Masyarakat Lokal

Hutan juga memberikan manfaat ekonomi dan sosial bagi masyarakat lokal yang tinggal di sekitarnya. Menurut penelitian oleh Rahman *et al.* (2020), hutan-hutan memberikan sumber penghidupan melalui berbagai aktivitas seperti pengumpulan kayu bakar, buah-buahan liar, dan lainnya. Selain itu, ekowisata dan industri berbasis hutan juga memberikan peluang kerja dan pendapatan tambahan bagi

masyarakat lokal, yang pada gilirannya dapat meningkatkan kesejahteraan mereka.

5.1.7 Penyebab Kerusakan Hutan

Hutan adalah salah satu aset berharga Bumi yang memberikan banyak manfaat bagi kehidupan manusia dan lingkungan secara keseluruhan. Namun, saat ini, hutan menghadapi ancaman serius akibat berbagai aktivitas manusia yang merusaknya. Berikut ini kita akan mengidentifikasi dan mengeksplorasi beberapa penyebab utama kerusakan hutan yang berdampak pada kehidupan di Bumi.

Gambar 5.2. Penggundulan Hutan di Kalimantan

(Sumber: https://nationalgeographic.grid.id/)

5.1.8 Deforestasi: Penggundulan Hutan yang Masif

Deforestasi adalah salah satu penyebab utama kerusakan hutan yang disebabkan oleh aktivitas manusia. Penelitian oleh Angelsen *et al.* (2019) menunjukkan bahwa faktor seperti ekspansi pertanian, pembangunan infrastruktur, dan penebangan liar menyebabkan hilangnya luas hutan yang signifikan setiap tahunnya. Deforestasi tidak hanya mengancam keberlangsungan hidup flora dan fauna hutan, tetapi juga menyebabkan hilangnya habitat bagi spesies-spesies yang bergantung pada hutan.

5.1.9 Perambahan Hutan untuk Ekspansi Pertanian dan Perkebunan

Perambahan hutan untuk ekspansi pertanian dan perkebunan juga merupakan penyebab signifikan dari kerusakan hutan. Studi oleh Meyfroidt *et al.* (2020) menemukan bahwa konversi hutan menjadi lahan pertanian dan perkebunan kelapa sawit, karet, dan lainnya telah mengakibatkan hilangnya habitat asli serta kehilangan keanekaragaman hayati yang tinggi di banyak wilayah hutan tropis.

5.1.10 Penyakit dan Hama yang Menyerang Hutan

Selain aktivitas manusia, penyakit dan hama juga merupakan faktor yang menyebabkan kerusakan hutan. Penelitian oleh Morin *et al.* (2021) menemukan bahwa perubahan iklim dapat meningkatkan prevalensi penyakit dan hama yang merugikan pepohonan di hutan-hutan tropis. Hal ini mengakibatkan kematian massal pohon dan penurunan produktivitas hutan secara keseluruhan.

5.1.11 Pembalakan Liar dan Perdagangan Kayu Ilegal

Pembalakan liar dan perdagangan kayu ilegal juga merupakan ancaman serius bagi keberlangsungan hutan. Studi oleh Tacconi *et al.* (2019) menunjukkan bahwa pembalakan ilegal sering kali terjadi sebagai upaya untuk memenuhi permintaan pasar kayu yang tinggi, terutama untuk industri konstruksi dan pembuatan furniture. Akibatnya, hutan-hutan yang berharga di seluruh dunia terus terancam hilang.

5.1.12 Perubahan Iklim dan Kebakaran Hutan

Perubahan iklim juga berkontribusi terhadap kerusakan hutan, terutama melalui peningkatan frekuensi dan intensitas kebakaran hutan. Penelitian oleh Bowman *et al.* (2019) menemukan bahwa suhu yang lebih tinggi dan pola curah hujan yang tidak stabil telah meningkatkan risiko kebakaran hutan di berbagai belahan dunia. Kebakaran hutan tidak hanya merusak ekosistem hutan, tetapi juga mengeluarkan gas rumah kaca yang berdampak pada perubahan iklim global secara keseluruhan.

5.1.13 Strateggi Konservasi Hutan

Konservasi hutan adalah upaya penting dalam mempertahankan keberlanjutan ekosistem hutan dan menjaga keanekaragaman hayati. Melalui strategi konservasi yang tepat, kita dapat melindungi hutan dari ancaman kerusakan dan mengembalikan ekosistem yang terganggu. Berikut ini kita akan membahas beberapa strategi konservasi hutan yang efektif untuk memastikan kelangsungan hutan di masa depan.

Gambar 5.3. Kegiatan Rehabilitasi Hutan di Kupang

(Sumber: https://lestari.kompas.com/)

5.1.14 Pelestarian Habitat Asli

Salah satu strategi konservasi hutan yang paling mendasar adalah pelestarian habitat asli. Menjaga keutuhan hutan primer dan menjauhkannya dari aktivitas manusia yang merusak adalah langkah penting dalam melindungi keanekaragaman hayati. Menurut penelitian oleh Barlow *et al.* (2019), upaya pelestarian habitat asli telah terbukti efektif dalam mempertahankan populasi spesies endemik dan mengurangi tingkat defaunasi di hutan-hutan tropis.

5.1.15 Rehabilitasi dan Restorasi Hutan

Selain menjaga habitat asli, rehabilitasi dan restorasi hutan juga merupakan strategi kunci dalam konservasi hutan. Penelitian oleh Chazdon *et al.* (2020) menunjukkan bahwa program restorasi hutan,

termasuk penanaman kembali pohon, pemulihan lahan terdegradasi, dan pengendalian spesies invasif, dapat membantu memulihkan struktur dan fungsi ekosistem hutan yang terganggu.

5.1.16 Pengelolaan Hutan Berbasis Masyarakat

Pengelolaan hutan berbasis masyarakat telah diakui sebagai model yang efektif dalam konservasi hutan yang berkelanjutan. Studi oleh Nasi *et al.* (2019) menemukan bahwa melibatkan masyarakat lokal dalam pengambilan keputusan terkait pengelolaan hutan dapat meningkatkan kesadaran akan pentingnya konservasi serta mengurangi tingkat aktivitas ilegal seperti pembalakan liar dan perburuan liar.

5.1.17 Implementasi Kawasan Konservasi

Pembentukan kawasan konservasi merupakan strategi penting dalam melindungi hutan-hutan yang rentan terhadap kerusakan. Menurut penelitian oleh Andrade *et al.* (2020), kawasan konservasi yang dikelola dengan baik dapat berfungsi sebagai "paru-paru" dunia yang menghasilkan oksigen, menyimpan karbon, dan menyediakan habitat bagi berbagai spesies.

5.1.18 Edukasi dan Kesadaran Lingkungan

Meningkatkan edukasi dan kesadaran lingkungan juga merupakan bagian integral dari strategi konservasi hutan. Penelitian oleh Shin *et al.* (2019) menunjukkan bahwa upaya untuk meningkatkan pengetahuan dan pemahaman masyarakat tentang pentingnya hutan dapat menghasilkan perilaku yang lebih peduli terhadap lingkungan dan lebih proaktif dalam melindungi hutan.

5.1.19 Manajemen Konservasi Sumber Air

Air sangat penting bagi semua makhluk hidup di Bumi. Mulai dari kebutuhan manusia seperti minum dan sanitasi hingga menjaga ekosistem yang sehat, air memiliki peran utama dalam menjaga kehidupan di planet ini. Namun, tekanan dari jumlah penduduk yang semakin banyak, perkembangan industri, dan perubahan iklim mengancam sumber air dengan polusi, eksploitasi berlebihan, dan kerusakan lingkungan. Oleh karena itu, melindungi sumber air menjadi

semakin penting agar ekosistem air dapat tetap berlanjut dan menyediakan air yang cukup dan bersih untuk masa depan.

Konservasi sumberdaya air tak hanya penting bagi manusia dan ekosistem, tapi juga berkaitan dengan stabilitas sosial dan ekonomi. Air yang melimpah mendukung pertanian, industri, dan pariwisata, yang penting bagi perekonomian banyak negara. Namun, jika distribusi dan pengelolaan air tidak seimbang, bisa menyebabkan konflik antara pengguna air, ketidakstabilan ekonomi, dan kemiskinan. Oleh karena itu, menjaga sumberdaya air bukan hanya investasi untuk masa depan lingkungan, tapi juga langkah penting dalam membangun masyarakat yang berkelanjutan dan sejahtera.

5.1.20 Manfaat Sumber Daya Air Bagi Kehidupan

Sumber daya air adalah elemen penting bagi keberlangsungan kehidupan di Bumi. Air tidak hanya menjadi kebutuhan dasar manusia, tetapi juga berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan memfasilitasi berbagai kegiatan ekonomi. Berikut ini kita akan menjelajahi beberapa manfaat utama sumber daya air bagi kehidupan.

Gambar 5.4. Irigasi Pertanian di Cirebon

Sumber: https://tabloidsinartani.com/

a. Penyediaan Air Bersih untuk Kehidupan Sehari-hari

Penyediaan air bersih adalah manfaat utama sumber daya air bagi kehidupan manusia. Air bersih digunakan untuk keperluan minum,

memasak, mandi, mencuci, dan berbagai aktivitas sehari-hari lainnya. Menurut penelitian oleh Li *et al.* (2021), keberadaan sumber air bersih sangat penting untuk menjaga kesehatan masyarakat dan mendukung kehidupan yang berkualitas.

b. Mendukung Pertanian dan Produksi Pangan

Sumber daya air juga memainkan peran krusial dalam mendukung pertanian dan produksi pangan. Irigasi merupakan salah satu contoh penggunaan air yang penting dalam meningkatkan produktivitas pertanian. Studi oleh Suryadi *et al.* (2019) menunjukkan bahwa sistem irigasi yang efisien dapat meningkatkan hasil panen dan mengurangi ketergantungan pada curah hujan.

c. Menyediakan Habitat bagi Keanekaragaman Hayati

Ekosistem air, termasuk sungai, danau, dan rawa-rawa, menyediakan habitat bagi berbagai spesies flora dan fauna. Penelitian oleh Poff *et al.* (2020) menemukan bahwa keberagaman ekosistem air mendukung kehidupan berbagai organisme, termasuk ikan, amfibi, burung air, dan tumbuhan air. Keanekaragaman hayati ini memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem air dan ekosistem darat yang terkait.

d. Energi Terbarukan: Pembangkit Listrik Hidro

Air juga merupakan sumber energi terbarukan yang penting, terutama melalui pembangkit listrik hidro. Menurut studi oleh Brown *et al.* (2019), pembangkit listrik hidro memiliki beberapa keunggulan, termasuk sebagai sumber energi yang bersih, ramah lingkungan, dan dapat diandalkan. Energi hidro dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

e. Rekreasi dan Pariwisata

Selain manfaat ekonomi dan ekologis, air juga memberikan manfaat sosial dan rekreasi bagi manusia. Kawasan air seperti pantai, danau, dan sungai menjadi tujuan wisata yang populer, memberikan kesempatan untuk berbagai aktivitas rekreasi seperti berenang, memancing, dan berperahu. Penelitian oleh Ditton *et al.* (2019)

menemukan bahwa pariwisata air memiliki dampak positif terhadap ekonomi lokal dan memberikan pengalaman liburan yang memuaskan bagi wisatawan.

f. Penyebab Kerusakan Sumber Daya Air

Sumber daya air merupakan aset penting bagi kehidupan di Bumi. Namun, berbagai faktor menyebabkan kerusakan pada sumber daya air, yang mengancam ketersediaan air bersih untuk kebutuhan manusia dan lingkungan. Berikut ini akan dibahas beberapa penyebab utama kerusakan sumber daya air serta dampaknya bagi kehidupan.

Gambar 5.5. Polusi Sungai di Jakarta
Sumber: https://www.liputan6.com/

g. Polusi Air dari Limbah Industri

Salah satu penyebab utama kerusakan sumber daya air adalah polusi air yang dihasilkan dari limbah industri. Limbah industri mengandung berbagai zat kimia beracun dan bahan pencemar lainnya yang dapat mencemari air sungai, danau, dan laut. Menurut penelitian oleh Hadi *et al.* (2019), limbah industri seperti limbah dari pabrik kimia, tekstil, dan pertambangan menjadi sumber utama polusi air di banyak daerah.

h. Penggunaan Pupuk dan Pestisida di Pertanian

Praktik pertanian intensif dengan penggunaan pupuk dan pestisida juga berkontribusi terhadap kerusakan sumber daya air. Limbah dari pertanian seperti sisa pupuk dan pestisida dapat merusak

kualitas air dan menyebabkan eutrofikasi, di mana kadar nutrien yang tinggi mengakibatkan pertumbuhan alga yang berlebihan. Penelitian oleh Widiastuti *et al.* (2020) menunjukkan bahwa praktik pertanian yang tidak berkelanjutan dapat mengancam ketersediaan air bersih di daerah agraris.

i. Pembuangan Limbah Domestik dan Sanitasi yang Buruk

Pembuangan limbah domestik dan sanitasi yang buruk juga merupakan penyebab kerusakan sumber daya air. Limbah domestik dari pemukiman manusia, terutama jika tidak diolah dengan baik, dapat mencemari air permukaan dan air tanah. Studi oleh Sharma *et al.* (2019) menemukan bahwa sanitasi yang buruk dan pembuangan limbah domestik tanpa pengolahan yang memadai merupakan masalah serius yang mengancam kualitas air di banyak daerah.

j. Urbanisasi dan Perubahan Tata Guna Lahan

Urbanisasi dan perubahan tata guna lahan juga berdampak pada kerusakan sumber daya air. Pembangunan perkotaan yang tidak terencana seringkali menyebabkan peningkatan aliran permukaan, erosi tanah, dan pencemaran air. Menurut penelitian oleh Setiawan *et al.* (2021), urbanisasi yang cepat di sepanjang sungai-sungai perkotaan menyebabkan penurunan kualitas air dan meningkatkan risiko banjir.

k. Perubahan Iklim dan Penurunan Ketersediaan Air

Perubahan iklim juga memiliki dampak signifikan terhadap sumber daya air. Pola curah hujan yang tidak teratur, peningkatan suhu, dan perubahan pola aliran sungai dapat mengurangi ketersediaan air bersih. Studi oleh Hossain *et al.* (2020) menunjukkan bahwa perubahan iklim telah menyebabkan penurunan jumlah air permukaan dan air tanah di berbagai wilayah, mengancam ketersediaan air bagi masyarakat.

5.2 Strategi Konservasi Sumber Daya Air

Sumber daya air adalah salah satu aset alam yang krusial bagi kelangsungan hidup manusia dan ekosistem. Namun, peningkatan aktivitas manusia telah menyebabkan tekanan yang signifikan pada ketersediaan dan kualitas air. Oleh karena itu, diperlukan strategi

konservasi yang efektif untuk memastikan pengelolaan yang berkelanjutan dan perlindungan sumber daya air. Berikut ini akan dibahas beberapa strategi konservasi yang dapat diterapkan untuk menjaga keberlanjutan sumber daya air.

Gambar 5.6. Aksi Peduli Lingkungan Perairan di Tambak Wedi Surabaya (Sumber: https://unair.ac.id/)

A. Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS)

Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan salah satu strategi utama dalam konservasi sumber daya air. Dengan memperhatikan tata guna lahan, restorasi hutan, dan pengendalian erosi, pengelolaan DAS dapat meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah dan mengurangi limpasan permukaan yang mengakibatkan banjir dan erosi tanah. Menurut penelitian oleh Asdak *et al.* (2020), upaya konservasi di DAS dapat meningkatkan kualitas air dan memperbaiki keseimbangan ekosistem air.

B. Pengembangan Teknologi Ramah Lingkungan

Pengembangan teknologi ramah lingkungan juga merupakan bagian penting dari strategi konservasi sumber daya air. Teknologi seperti sistem pengolahan air limbah yang efisien, penggunaan teknologi irigasi yang hemat air, dan metode pertanian berkelanjutan dapat membantu mengurangi polusi air dan konsumsi air secara berlebihan.

Penelitian oleh Pramudito *et al.* (2019) menyoroti pentingnya inovasi teknologi dalam menjaga kualitas dan ketersediaan air.

C. Pendidikan dan Kesadaran Lingkungan

Pendidikan dan kesadaran lingkungan merupakan faktor kunci dalam strategi konservasi sumber daya air. Melalui pendidikan lingkungan di sekolah, kampanye publik, dan pelatihan masyarakat, kesadaran akan pentingnya menjaga kebersihan sungai, konservasi air, dan perlindungan sumber daya air dapat ditingkatkan. Studi oleh Setiawan *et al.* (2021) menunjukkan bahwa pendidikan lingkungan dapat membentuk perilaku yang lebih bertanggung jawab terhadap pengelolaan sumber daya air.

D. Pengaturan Kebijakan dan Hukum Lingkungan

Pengaturan kebijakan dan hukum lingkungan yang efektif juga diperlukan untuk mendukung konservasi sumber daya air. Kebijakan yang mendukung perlindungan kualitas air, pengelolaan DAS, dan penggunaan air yang efisien dapat membantu mengatur aktivitas manusia yang berpotensi merusak sumber daya air. Penelitian oleh Nurhayati *et al.* (2020) menyoroti pentingnya kebijakan yang berbasis ilmiah dan partisipatif dalam menjaga keberlanjutan sumber daya air.

E. Kerjasama Antar Pihak dan Partisipasi Masyarakat

Kerjasama antar pihak dan partisipasi masyarakat juga sangat penting dalam strategi konservasi sumber daya air. Melalui keterlibatan aktif masyarakat lokal, LSM, pemerintah, dan sektor swasta, dapat dibangun kemitraan yang kuat untuk melaksanakan program konservasi air secara berkelanjutan. Penelitian oleh Oktaviani *et al.* (2019) menekankan peran penting partisipasi masyarakat dalam mengidentifikasi masalah air lokal, mengembangkan solusi bersama, dan memonitor keberhasilan program konservasi.

Bab 6

MANAJEMEN REKAYASA UNTUK MITIGASI BENCANA ALAM

6.1 Strategi dan Teknik dalam Pengendalian Banjir

Letak Indonesia yang berada di wilayah rentan terhadap bencana di sebabkan posisi Indonesia berada diantara tiga lempeng/ kulit bumi aktif yaitu Lempeng Indo Australia yang terletak di bagian selatan, Lempeng Euro Asia yang berada di bagian utara dan Lempeng Pasifik yang terletak di bagian timur. Lokasi Indonesia di perburuk dengan lingkaran cincin gunung merapi aktif yaitu 129 gunung aktif dan 80 diantaranya berbahaya. Indonesia dengan beragam bencana memerlukan penanganan khusus agar dapat mereduksi kejadian yang tidak diharapkan pada saat terjadi bencana. Perlunya komitmen global sangat berpengaruh terhadap kebijakan Penanggulangan bencana di Indonesia. Lahirnya berbagai kebijakan yang merupakan hasil dari komitmen global mendorong gerakan bersama dalam giat pengurangan risiko bencana. Hal ini terwujud melalui komitmen dalam bentuk tindak lanjut melalui kesepakatan berbagai Negara yang tertuang dalam konsep dan konteks masing-masing (Purwanto Sigit, 2020).

Bencana dapat terjadi kapan saja dan di manasaja yang berpotensi mengancam dan merusak (hazard) dan terjadi kerentanan (Vulnerability) dalam kebijakan bencana di Indonesia diatur dalam UU No. 24 tahun 2007 yang menyatakan bahwa bencana merupakan peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan masyarakat baik oleh faktor alam/ non alam maupun faktor manusia sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan

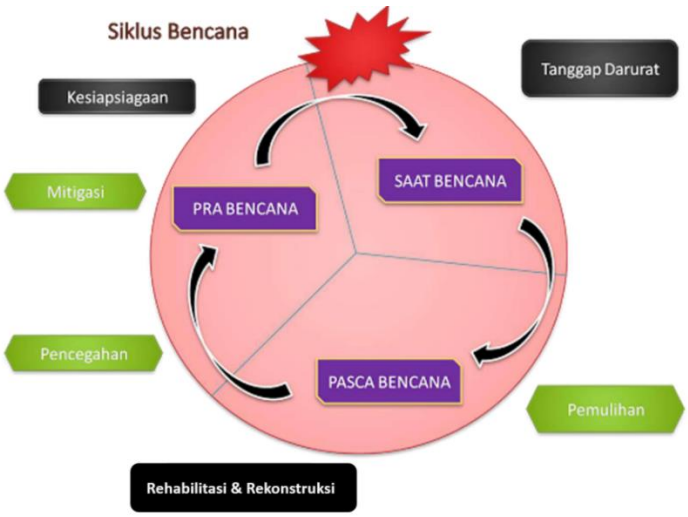
lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis sehingga apabila hazard terjadi akan tetapi masyarakat tidak rentan, maka masyarakat telah dapat mengatasi sendiri permasalahan yang mengganggu, sementara apabila kondisi masyarakat rentan, akan tetapi tidak terjadi peristiwa yang mengancam maka tidak akan terjadi bencana (Purnama, 2018).

Perubahan orientasi paradigm pengelolaan bencana melahirkan Undang-undang penanggulangan bencana di Indonesia. Perubahan tersebut terletak pada penanganan kegiatan yang bersifat preventif yaitu focus pada tahap sebelum terjadinya bencana sehingga, program mitigasi berjalan dengan tetap mereduksi risiko bencana yang akan terjadi. Aksi kegiatan di fokuskan pada tahap pra bencana dengan tetap mempertimbangkan potensi bencana yang akan terjadi tidak terfokus pada tanggapdarurat dan penanggulangan pada terjadi bencana.program penanggulangan bencana pada dasarnya di klasifikasikan menjadi : (a) Kesiapsiagaan (b) Peringatan dini (c) Mitigasi bencana. (Heryati, 2020).

Kejadian bencana di Indonesia menggambarkan bahwa betapa begitu pentingnya pembelajaran bencana sejak dini dengan gambaran begitu banyaknya korban jiwa, kerugian harta benda, kerusakan lingkungan dan dampak psikologis yang akibatkan oleh bencana. Kejadian-kejadian yang menjadi gambaran begitu dahsyatnya bencana di Indonesia adalah gempa bumi dan sunami di Aceh, dan Nias, kejadian yang menelan banyak korban jiwa menyadarkan kita betapa pentingnya perencanaan penanggulangan bencana di Indonesia. Kejadian bencana Aceh dan Nias mendorong perubahan paradigma perencanaan penanggulangan bencana dari kegiatan yang bersifat tanggap darurat bencana menjadi paradigm pencegahan dan pengurangan risiko (Safani Jamhir, 2017).

Indonesia sebagai negara rawan bencana tentunya selalu mawas dan ikut dalam kegiatan pengembangan dan perencanaan penyelenggaraan penanggulangan bencana yang berpedoman pada Undang-undang No. 24 tahun 2007 tentang penanggulangan bencana dan Peraturan Pemerintah mengenai penyususnan dokumen Pengurangan

Risiko Bencana sebagai program penanggulangan bencana melalui perencanaan yang tergambar dalam program sebagai berikut :



Gambar 6.1. Siklus bencana dan Sistem Penanggulangannya (Purwanto Sigit, 2020)

Banjir merupakan bencana alam yang sering terjadi di Indonesia. Banyaknya kerugian harta benda akibat bencana banjir hampir terjadi merata di seluruh wilayah Indonesia selain itu tak jarang terjadi korban jiwa akibat terseret arus, kerusakan lingkungan akibat banjir bandang bahkan diikuti dengan tanah longsor merupakan kejadian bencana akibat cuaca ekstrim yang biasanya di sebut bencana hidrometerologis. Kejadian bencana banjirpun mengakibatkan dampak psikologis bagi mereka yang mengalaminya mulaidari yang bersifat traumatik maupun bersifat depresi akibat kerugian dan kehilangan harta benda maupun manusia. (K, 2017).

Banjir dapat diakibatkan oleh curah hujan yang tinggi yang mengakibatkan tergenangnya air akibat luapan air sungai, kiriman air dari lokasi hujan yang lebih tinggi mapun hujan yang bersamaan dengan naiknya air pasang di laut. Curah hujan di Indonesia tergolong tinggi yaitu berisar antara 2000-3000 mm/tahun dengan range waktu antara bulan oktober sampai dengan bulan januari. Dengan banyaknya sungai besar di Indonesia kondisi rawan banjir sangat berpotensi sehingga membutuhkan pengelolaan perencanaan penanggulangan bencana yang

baik mulaidari tindakan preventif pra bencana sampai pada pasca bencana.

Di sisi lain, banjir pesisir tak jarang terjadi hal ini dikarenakan tingginya air laut pasang yang bertemu dengan hujan intensitas tinggi dengan durasi yang cukup lama dapat berakibat banjir pesisir (Rob) yang banyak terjadi pada kota-kota yang terus mengalami penurunan permukaan tanah dan naiknya permukaan air laut akibat pemanasan global. Banjir pesisir (rob) menjadi masalah utama pada kota-kota diantaranya Semarang, Jakarta dan wilayah pesisir pantai utara Jawa sehingga akan menjadi masalah yang besar di masa yang akan datang seiring dengan pemanasan global dan ekstraksi air tanah yang tidak terkendali yang berdampak pada penurunan permukaan tanah (land subsidence) (Findayani, 2015).

Hujan dengan intensitas tinggi yang bertemu dengan pasang naik air laut mengakibatkan banjir pesisir (Rob) yang diperparah dengan perilaku manusia yang kurang baik diantaranya pembuangan sampah di saluran airdan sungai, pembangunan di jalur hijau atau dibantaran sungai, penggndulan hutan dan lain sebagainya. Jenis banjir terdiri dari Banjir Genangan, Banjir bandang dan banjir rob akibat kenaikan permukaan air laut. Penyebab banjirpun bermacam-macam diantaranya:

1. Permukaan tanah lebih rendah dibandingkan muka air laut
2. Terletak di cekungan yang dikelilingi bukit dengan semptnya pengaliran air.
3. Curah hujan dengan intensitas tinggi.
4. Banyaknya pemukiman yang dibangun pada bantaran sungai.
5. Aliran sungai yang tidak lancar akibat banyaknya sampah.
6. Kurangnya tutupan patahan di daerah hulu sungai.
7. Hindari berada pada saluran air sehingga terhindar dari terseret arus banjir.
8. pemadaman aliran listrik di dalam rumah atau hubungi PLN untuk pemadaman aliran listrik di wilayah yang terkena bencana (Purwono, 2020).

Kejadian banjir tidak dapat di duga dan diprediksi karena perubahan rona lingkungan ikut mengakibatkan perubahan pola banjir selain itu kerusakan sarana saluran air seperti tanggulatau bendungan yang jebol dapat pula mengakibatkan banjir dan dapat di prediksi jika banjir kerap terjadi di tempat yang sama setiap tahunnya. Kejadian banjir sangat merugikan masyarakat baik secara sosial ekonomi maupun secara kesehatan dan kerusakan lingkungan. Kejadian banjir dapat mengakibatkan pemadaman listrik, kerusakan lingkungan, melumpuhkan sarana transportasi, menghentikan aktivitas kehidupan sehari-hari, menghilangkan dan merusak harta benda, menimbulkan korban manusia, mengganggu perekonomian, hilangnya harapan dan masa depan, adanya tana longsor dan erosi serta adanya gangguan kesehatan (Dadan, 2018).

Adapun strategi dan teknik pengendalian banjir:

a. Giat Preventif Pra Bencana adalah kegiatan yang secara bertahap dilakukan sebagai langkah untuk mereduksi dan/atau menghilangkan ancaman bencana. Preventif kebencanaan dalam perencanaan pengendalian banjir dilaksanakan melalui perlakuan di lokasi bencana sehingga dapat meminimalisir ancaman agar bencana dapat dihindari misalnya dengan mendirikan tanggul, kolam retensi dan program pembersihan sampah di salurn-saluran air (Safani Jamhir, 2017).

b. Siap Siaga Bencana dilaksanakan melalui program yang pelaksanaannya diharapkan dapat mengantisipasi terjadinya banjir melalui sistem koordinasi yang baik serta melakukan strategi yang tepat guna dan daya guna. Perencanaan penaggulangan bencana yang bersifat bencana alam, non alam, dan sosial khususnya bencana banjir diharapkan dapat menjadi program yang berlangsung secara kontinyu khususnya wilayah-wilayah yang terdeteksirawan banjir. Perencanaan penanggulangan bencana banjir pada umumnya di mulai dari perencanaan hingga penanganan pada saat sebelum terjadinya bencana sampai pada setelah terjadinya bencana. Program yang dilaksanakan padaumumnya secara bertahap mulai dari pencegahan, mitigasi bencana untuk wilayah rawan banjir dan

strategi pelaksanaan mitigasi bencana, kesiapan dalam menghadapi bencana, penanganan darurat, serta pemulihan.(Irma Jesika Dianti, 2017).

c. Early Warning System/ Peringatan dini merupakan tahapan program yang dilakukan dalam bentuk pemberian peringatan sesegera mungkin kepada masyarakat yang terdampak dan edukasi mengenai kemungkinan terjadinya bencana pada suatu tempat oleh lembaga yang berwenang. Pelaksanaan program dapat berupa pemberian marka atau tanda-tanda serta penyediaan/ pemasangan *early warning system* di wilayah rawan bencana berupa dapat berupa seismograf yang berfungsi sebagai menangkap singnal digital (Gelombang sekunder) dan secara realtime untuk keperluan mendeteksi dini dalam pembangunan teknologi pencegahan bencana pada zona prioritas (Heryati, 2020).

d. Mitigasi adalah tahapan pelaksanaan pengurangan risiko bencana yang dilakukan melalui pembangunan fisik maupun program awarness dalam meningkatkan kemampuan menghadapi ancaman bencana. Pelaksanaan mitigasi bencana dilakukan dengan pembangunan zona penghalang antara potensi bencana dengan faktor risiko yang ada. Mitigasi diartikan sebagai sesuatu yang struktural dilakukan dengan pengokohan bangunan insfrastruktur yang berpotensi menjadi tempat terjadinya bencana banjir misalnya dengan membuat kode bangunan, desain rekayasa dan lain sebagainya, hal lain yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan program mitigasi yang non struktural dengan meningkatkan kapasitas dan pemahaman masyarakat akan besarnya potensi bencana banjir sehingga melahirkan kepekaan dan kesiapsiagaan secara akurat dalam melakukan tindakan pada saat terjadi bencana.

e. Tanggap darurat adalah tahapan program yang dilaksanakan dengan cepat pada saat terjadi bencana yang berupa penanganan dampak yang ditimbulkan, program tanggap darurat bencana dilakukan melalui penyelamatan maupun evakuasi korban selain itu juga penyelamatan terhadap harta benda, pemenuhan kebutuhan dasar, perlindungan bagi masyarakat terdampak, penrencanaa

shalter bagi pengungsi, penyelamatan koban, serta perbaikan sarana dan prasarana. Pelaksanaan tanggap darurat dapat dilakukan dengan melakukan kegiatan Peningkatan kapasitas masyarakat utamanya dalam sosialisasi sistem peringatan dini kepada masyarakat sesuai dengan kondisi wilayah meskipun wilayah tersebut belum memiliki akses yang memadai dari segi komunikasi, di samping itu perlu adanya pemahaman mengenai peringatan bahaya bagi masyarakat serta jenis-jenis dampak yang mungkin dapat terjadi serta kategorinya. Respon pelaksanaan program yang menyangkut partisipasi masyarakat akan muncul sesuai dengan jenis bencana dan cakupan bencana sesuai dengan luas daerahnya sehingga perlu dipertimbangkan serta disesuaikan dengan rencana kesiapsiagaan (Safani Jamhir, 2017).

f. Rehabilitasi merupakan program dalamrangka pemulihan dan perbaikan berbagai aspek pelayanan publik masyarakat dari yang kurang memadai sampai pada tingkat yang layak di wilayah terdampak dengan prioritas terjadinya normalisasi kehidupan masyarakat yang di tandai dengan berjalannya aktivitas masyarakat dan pemerintahan di wilayah pasca bencana secara wajar. Melaksanakan perumusan kembali kebijakan serta penatakelolaan sistem pemerintahan yang dapat mengkover seluruh aspek dalam rangka memulihkan kembali kondisi masyarakat pasca banjir.

g. Rekonstruksi merupakan program pembangunan kembali sarana dan prasarana serta pengoranisasian sistem kelembagaan di daerah pasca bencana, pelaksanaan program dilakukan mulai dari tingkat tertinggi yaitu pemerintahan sampai pada masyarakat terdampak kegiatan yang di maksud adalah program secara komprehensif di mulai daripembangunan sumber daya ekonomi, sosial, budaya, ketertiban dan penegakkan hokum, pemberdayaan masyarakat sampai pada perencanaan, penatakelolaan, pelaksanaan bidang Bina Marga, Sumber Daya Air, Air Minum dan Sanitasi, Tata Bangunan Gedung, Permukiman, Jasa Kontruksi dan Tata Ruang dalam melaksanakan tugas memenuhi pemulihan kehidupan masyarakat pasca bencana khususnya wilayah yang terdampak dan mengalami

kerugian yang cukup besar sebagai wilayah prioritas tinggi (Heryati, 2020).

6.2 Manajemen Risiko Gempa Bumi

Karakteristik negara Indonesia yang majemuk dengan karakteristik sumber daya berbeda –beda merupakan suatu anugerah yang sangat luar biasa. Karakteristik negara Indonesia tidak hanya dari sisi perbedaan budaya dan kemajemukannya namun di sisi lain Indonesia memiliki karakteristik ancaman bencana alam dengan berbagai macam jenis dan variasinya utamanya ancaman gempa bumiyang cenderung berfrekwensi tinggi. Kejadian bencana yang cenderung spontan terjadi berdampak pada kerugian masyarakat yang mengalaminya diantaranya kerugian harta benda, kerusakan lingkungan pemukiman warga, cidera fisik bahkan meninggal dunia. Bagi mereka yang di tinggaloleh keluarganya akan meninggalkan duka dan trauma yang mendalam bagi keluarga korban yang mengalaminya (Marfuah et al., 2021).

Keadaan geografis Indonesiayang berada di *ring of fire* dengan jalur gunung berapi aktif menjadikan negara Indonesia tidak lepas dari ancaman gunung meletus dan gempatektonik. Fenaomeni yang sering terjadi di daerah gubung merapiaktif adalah genpatektonik yang mengakibatkan kerusakan lingkungan dan korban jiwa yang meninggalkan trauma psikologis bagi (Hamdani, 2017).

Aspek manajemen risiko menjadihal yang sangat penting bagi wilayah risiko bencana gempa bumi dikarenakan dengan bertambhnya waktu kekayaan negara semakin tinggi utamanya di wilayah rawan bencana. Penambanhan bangunan milik negara dalam pembangunannya perlu memperhatikan potensi bencana yang ada utamanya di wilayah rawan bencana, salah satu pertimbangan khusus diantaranya ketahanan bangunan anti gempa, hal ini di lakukan agar ketika terjadi bencana risiko dapat di meminimalisir khususnya kerusakan dan hilangnya aset Barang Milik Negara (BMN) akibat bencana.

Terjadinya peningkatan pertambahan aset negara tanpa mempertimbangkan manajemen risiko merupakan penyebab dasar terjadinya peningkatan kerugian aset negara akibat bencana khususnya gempa bumi. Besarnya kerusakan akibat bencana di Indonesia mencapai

khususnya bencana alam berupa gempa bumi mencapai 5 sampai dengan 8 kali biaya untuk membangun jembatan besar, sehingga laju pembangunan sangat berpengaruh jika bencana terjadi di suatu wilayah (Juani & Dorojatun, 2019).

Perubahan kebijakan yang terjadi di Indonesia terjadi akibat adanya bencana besar yang sangat merugikan negara diantaranya lahirnya Undang-undang No, 24 tahun 2017 tentang Penanggulangan Bencana merupakan implikasi dari terjadinya bencana gempa tsunami di Aceh dan gempa di Bantul. Lahirnya undang-undang No. 24 tahun 2017 tentang Penanggulangan Bencana mendorong perubahan paradigm bencana dari yang bersifat pasif menjadi lebih reaktif yang di mulai pada saat pra bencana dengan tindakan preventif sehingga masayarakat siap menghadapi bencana bahkan sampai pada penanggulangan pasca bencana (Fadillah Muhamad, 2020).

Pengelolaan risiko bencana dilakukan secara bertahap di mulai dengan menemukan kerugian potensial selanjutnya di lakukan identifikasi risiko murni yang dihadapi oleh suatu wilayah. Dari identifikasi yang dilakukan, maka akan dilakukan program evaluasi terhadap kerugian potensial yang dapat terjadi meliputi :

a. Perhitungan besar frekwensi atau kemungkinan terjadinya kerugian.
b. Pengukuran besar kegawatan atau menilai besar kerugian yang mungkin akan diderita (Anwar Daud, 2013).

Tersususnnya evaluasi selanjutnya selanjutnya dilakukan pemilihan alternatif atau kombinasi cara secara tepat gunauntuk menanggulangi kerugian yang terjadi. Teknik/cara atau kombinasi dilakukan dengan menentukan kawasan prioritas yang di sesuaikan dengan tingkat kerusakan yang terjadi hal ini dapat menemukan zona prioritas penanggulangan bencana akibat gempa bumi agar program penanggulangan bencana yang di lakukan tepat sasaran. Berikut pembagian kawasan sesuai dengan kemungkinan tingkat kerusakannya:

1. Kemungkinan Tingkat Kerusakan Tinggi Frekwensi Tinggi/Kawasan I

Terjadinya bencana besar mengakibatkan kerusakan yang cukup tinggi pada kawasan I menunjukkan kerugianyang cukup besar sehingga

pembangunan infrastruktur yang di lakukan akan berdampak besar. Kegiatan yang utama dilakukan pada kawasan ini adalah pembanguanan jalan dan bangunan-bangunan vital sepertu pusat pengobatan, pos polisi dan pembangunan sarana air minum serta pemadam kebakaran.

Hal ini sangat membantu masyarakat yang terdampak khususnya dalam mengakses jalan dan sistem perlindungan pada saat tanggap darurat dan pasca bencana di wilayah kemungkinan dengan tingkat kerusakan tinggi. Pelaksanaan pengelolaan lokasi dengan lokasi kemungkinan kerusakan tinggi lebih memprioritaskan bagaimana bentuk evakuasi warga agar dapat berada di wilayah dengan zona yang lebih aman.

Penataan gedung pemerintah dan infrastruktur lain biasanya untuk wilayah ini di tata sedemikian rupamisalnya dengan bangunan paling tinggi cukup dua lantai sehingga beban yang di sangga oleh bangunan tidak melebihi batas aman. Berdasarkan Peraturan menteri Pekerjaan Umum No. 45/PRT/M/2007 tentang Pedoman Teknis Pembangunan Banguanan Gedung Negara diharapkan banguanan pada wilayah ini bersifat regular dengan keseragaman pada semua sisi dengan bentuk bangunan tidak terlalu memanjang (Juani & Dorojatun, 2019).

2. Kemungkinan Tingkat Kerusakan Rendah Frekwensi Tinggi/Kawasan II

Terjadinya kemungkinan terjadinya bencana yang sedang mendorong daerah rawan bencana dengan kemungkinan tingkat kerusakan rendah dengan frekwensi tinggi cenderung mengaplikasikan program retensi atau penguatan dan pengendalian dengan memperhatikan bentuk perencanaan evakuasi yang baik dan asuransi untuk gedung sarana dan prasarana pemerintah. Pada kondisidi kawasan II masih tetap mempertimbangkan untuk pembangunan infrastruktur gedung secara sederhana misalnya bangunan-bangunan yang terbuat dari kayu namun bangunan yang bersifat eksisting dengan peralatan khusus harus di evakuasi ke tempat dengan zona yang lebih aman.

3. Kemungkinan Tingkat Kerusakan Tinggi frekwensi Rendah/Kawasan III

Pada zona kawasan III dengan kemungkinan tingkat kerusakan tinggi frekwensi rendah, sistem amanajemen bencana yang dilakukan adalah dengan pemberian sistem asuransi dan pengendalian dan manajemen pengendalian evakuasi warga terdampak. Pembangunan infrastruktur dilakukan dengan memperhitungkan secara matang dengan jumlah yang telah di tentukan serta diikuti dengan perlindungan asuransi yang memadai. Untuk bangunan eksisting yang membutuhkan pemeliharaan dan peralatan kusus misalnya laboratorium harus di perhatikan dengan baik dan di lakukan evakuasi ke zona yang lebih aman.

4. Kemungkinan Tingkat Kerusakan Rendah Frekwensi Rendah/ Kawasan IV

Pada kawasan IV dengan kemungkian tingkat kerusakan rendah dan frekwensi rendah merupakan wilayah yang tergolong aman sehingga segala jenis infrastruktur dapat di bangun baik gedung maupun sarana vital seperti bandara, rel kereta api, pipa gas,pusat listrik dan lain sebagainya. Kawasan ini memungkinkan terjadinya aktivitas yang memadai bagi masyarakat yang bermukin di wilayah tersebut.

5. Risiko dan Pembiayaannya

Risiko dan pembiayaannya merupakan suatu kesatuan dimana setiap terjadi suatu risiko tentunya ada pembiayaan akan kerugian yang terjadi. Pengendalian terhadap risiko dapat di lakukan dengan mengendalikan eksisting infrastruktur yang di bangun serta langkah pemenuhan biaya risiko melalui asuransi. Pentingnya pengendalian risiko infrastruktur tentunya harus dibarengi dengan kesiapan pembiayaan risiko bencana melalui asuransi yang dapat mengkover kondisi bangunan pasca terjadinya bencana.

Pembiayaan risiko meliputi asuransi dan saving cost. Berada di lingkugan bencana dengan risiko bencana rendah di harapkan dapat memilih alternative saving cost untuk dapat melakukan perencanaan pembangunan. Saving cost dapat menghemat anggaran dalam

pembayaran premi asuransi setiaptahunnya. Sebaliknya jika berada pada wilayah dengan risiko bencana tinggi dan tidak dapat di prediksi maka perlu adanya asuransi untuk dapat mengkover bangunan infrastruktur yang tidakdapat di rediksi kerusakannya sehingga ketika bencana datang perbaikan infrastruktur dapat dibantu dari hasil permi asuransiyang telah di ikutkan (Anwar Daud, 2013).

Bab 7

PERUBAHAN IKLIM DAN REKAYASA LINGKUNGAN

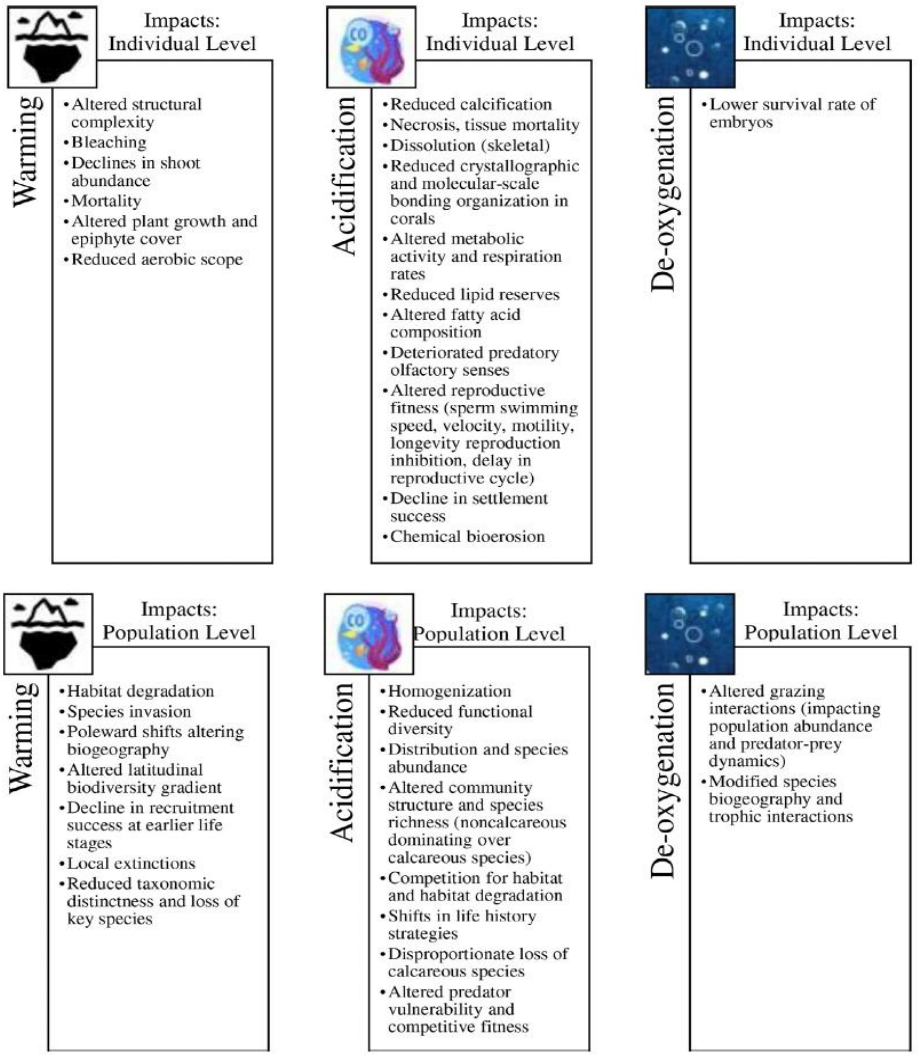
Iklim dan lautan dunia berada dalam kondisi yang belum pernah terjadi sebelumnya, dipengaruhi oleh keanekaragaman hayati, polusi dan emisi. Perubahan ini meningkatkan risiko yang melampaui batas lingkungan yang menggambarkan ruang aman bagi manusia dan mempengaruhi semua aspek kesejahteraan manusia. Kaum muda saat ini, mulai dari anak-anak berusia 0–18 tahun dan remaja berusia 15–24 tahun semakin khawatir akan dampak perubahan iklim dan dampaknya bagi manusia.

Sampai saat ini, perspektif ilmu pengetahuan dan kebijakan mengenai kesehatan populasi manusia belum tentu mempertimbangkan lingkungan ekosistem alami (Horton *et al.,* 2014). Keanekaragaman hayati laut merupakan pusat dari hidrosfer bumi, dan juga ekosistem alami bumi: perubahan dan penurunannya memiliki dampak kesehatan yang besar pada peradaban manusia. Dalam kondisi yang disebabkan oleh perubahan iklim, sistem bumi (yaitu atmosfer, hidrosfer, biosfer, geosfer, dan antroposfer) yang mengatur stabilitas dan ketahanan planet ini telah dengan cepat diubah oleh aktivitas manusia di era modern (Steffen *et al.*, 2015). Sistem ini sekarang berada di bawah ancaman (Lewis & Maslin, 2015) dan dalam beberapa kasus menyebabkan terjadinya kepunahan spesies (Thomas *et al.,* 2004; WHO, 2015) dan hilangnya alam serta degradasi sistem alam.

7.1 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Lingkungan

Meskipun lautan telah melindungi manusia dari dampak terburuk perubahan iklim dengan menyerap lebih dari 90% kelebihan

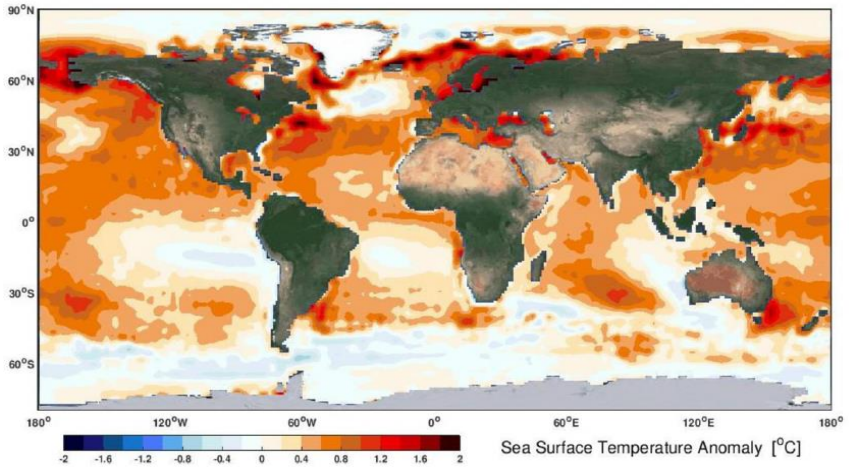
peningkatan suhu global, dan sekitar 25% emisi CO2 (MBARI, 2019), perubahan iklim menyebabkan (i) pemanasan laut, (ii) pengasaman, dan (iii) deoksigenasi (IPCC, 2019). Seperti diilustrasikan pada **Gambar 7.1**, dampaknya menimbulkan ancaman besar terhadap keanekaragaman hayati baik pada tingkat individu maupun populasi organisme laut.



Gambar 7.1 Dampak pemanasan laut, pengasaman dan de-oksigenasi pada tingkat individu dan populasi

(Sumber: Talukder *et al.*, 2022)

Seperti dijelaskan pada **Gambar 7.1**, pada tingkat individu, hasil tinjauan menunjukkan kenaikan suhu air laut berdampak pada sistem biologis spesies laut dalam berbagai cara, termasuk: pencernaan dan kekebalan tubuh pada bulu babi (*Lytechinus variegate*) (Brother *et al.*, 2018), memburuk respirasi dan indeks somatik gonad pada bulu babi (*Paracentrotus lividus*) (Yeruham *et al.,* 2020), kematian tunas, munculnya epifit pada daun lamun (Marba & Duarte, 2010; Peirano *et al.,* 2011), penurunan kelangsungan hidup larva pada spesies perikanan utama seperti ikan air tawar (*Sparus aurata*) (Madeira *et al.,* 2016), hilangnya kompleksitas struktur karang akibat pemutihan (Graham *et al.*, 2006), dan penurunan lingkup aerobik pada ikan karang (*Acanthochromis polyacanthus*) (Rolfer *et al.,* 2021). Pemanasan dan eutrofikasi juga ditemukan melemahkan kemampuan tanaman laut (*Posidonia oceanica*) untuk mengatasi berbagai stress lingkungan (Pazzaglia *et al.,* 2020). Meningkatnya gas rumah kaca mencegah panas terpancar dari permukaan bumi lepas ke luar angkasa. Lebih dari 90% kelebihan panas atmosfer telah hilang kembali dan diserap oleh air permukaan laut, (Cheng, 2017; IPCC, 2019). Hasilnya, panas laut meningkat secara signifikan belakangan ini (**Gambar 7.2**).



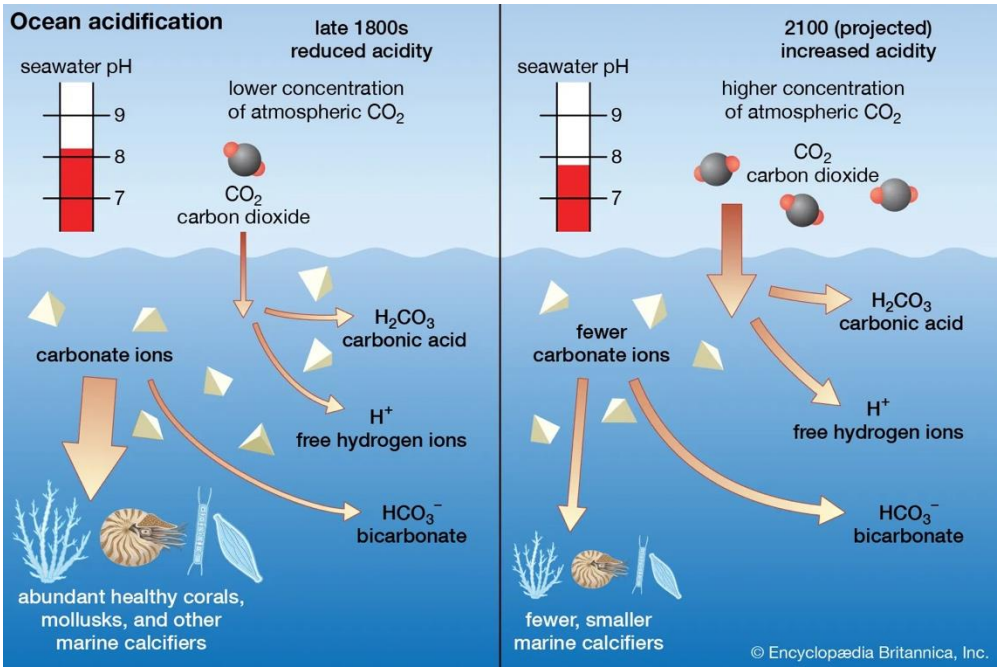
Gambar 7.2 Pengamatan satelit terhadap anomali suhu permukaan laut selama lima tahun terakhir (2015−2019) dengan mengacu pada data lima tahun pertama (1982−1986).

(Sumber: Diadaptasi dari Yang *et al.,* 2020 dan AWI, 2020)

Karena ekspansi termal dari pemanasan air laut, dan mencairnya gletser, permukaan laut meningkat secara global (Church *et al.,* 2013). Di dekade sebelumnya, peningkatan ini telah meningkatkan banjir pesisir (Portner *et al,*2019). Jika rata-rata kenaikan suhu global mencapai 1,5 °C, gelombang panas laut lokal yang tidak normal diproyeksikan menjadi peristiwa delapan sampai seratus tahun, dan jika peningkatan suhu rata-rata global diperkirakan mencapai 3 °C menjadi peristiwa tahunan hingga ratusan tahun (Laufkotter *et al.,* 2020).Arus laut memiliki dua peran penting terkait suhu dalam sistem bumi: (i) penyimpanan dan pelepasan panas musiman dan (ii) pergerakan panas melalui sistem sirkulasinya (Winton, 2003). Arus ini terkena dampak pemanasan laut, dan hal ini akan menyebabkan perubahan pola iklim di seluruh dunia serta cuaca yang lebih ekstrem, seperti banjir, angin topan, hujan deras (Yang *et al.,* 2020).

Pemanasan laut mempengaruhi dan mengubah keanekaragaman spesies, pola kelimpahan dan komposisi komunitas, kepunahan, dan memicu pergeseran ke kutub. Besarnya perubahan sebaran spesies dan tingkat respons terhadap pemicu stres yang disebabkan oleh perubahan iklim bervariasi berdasarkan serangkaian faktor, termasuk: ambang batas termal suatu spesies; ukuran populasi; perubahan habitat dan degradasi; ketersediaan sumberdaya; persaingan dengan *invasive* spesies; dinamika predator-mangsa dan strategi migrasi. Perairan laut dalam tidak lagi menjadi tempat berlindung yang aman dari permukaan laut akibat pemanasan global, dan keanekaragaman hayati perairan laut dalam memiliki risiko yang lebih tinggi dibandingkan di permukaan karena adanya kecepatan arus. Paus sperma (*Physeter macrocephalus*) dan Paus Hidung Botol (*Hyperoodon ampullatus*) mungkin mengalami pergeseran keanekaragaman hayati seiring dengan peningkatan lintang lautan yang lebih tinggi (daerah kutub) dari daerah tropis. Mencairnya es menyebabkan dampak negatif pada eukariota terkait dan mengubah keanekaragaman hayati mikrozooplankton, sedangkan perubahan drastis dalam peristiwa gerusan es (pencungkilan atau pengerjaan ulang dasar laut pada wilayah pantai dangkal yang disebabkan oleh es laut yang terapung) dapat menimbulkan dampak yang signifikan terhadap komunitas bentik tergantung pada kemampuan sesil mereka.

Penyerapan CO_2 yang berlebih di laut menyebabkan pengasaman dimana konsentrasi CO_2 dan bikarbonat (HCO_{3-}) meningkat sementara konsentrasi ion karbonat ($CO3^{-2}$) dan pH menurun (Barker & Ridgwell, 2012) (**Gambar 7.3**). Peningkatan sedimentasi di perairan pesisir juga ditemukan sebagai faktor yang menyebabkan pengasaman laut (Smith *et al.,* 2020). Pengasaman laut memberikan dampak lebih besar pada struktur anatomi kalsium karbonat spesies berkapur daripada spesies non-kapur (Asnaghi *et al.,* 2013). Hal ini mengubah fungsi keanekaragaman ekosistem termasuk habitat biogenik pesisir (Sunday *et al.,* 2017) menghasilkan homogenisasi dan penyederhanaan ekosistem.

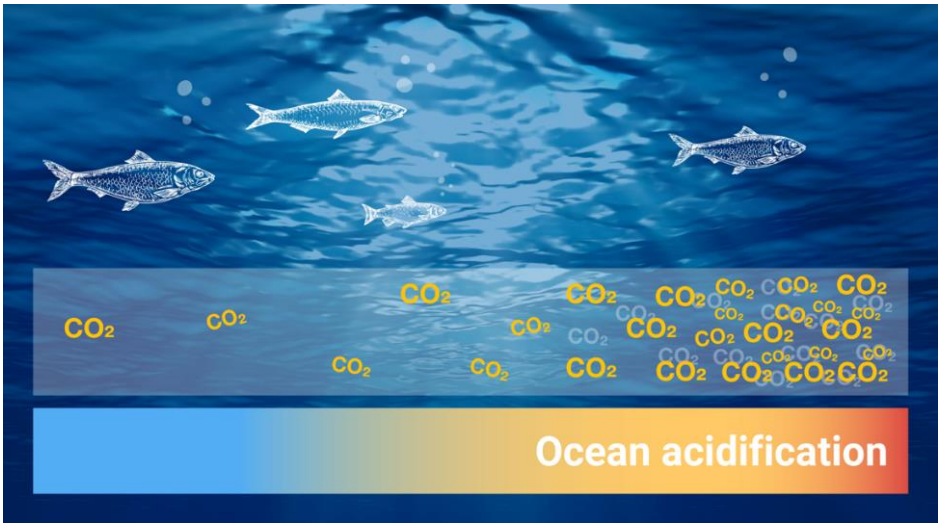


Gambar 7.3 Proses pengasaman laut

(Sumber: Barker & Ridgwell, 2012)

Eksperimen mesokosmos menunjukkan moluska menjadi yang paling sensitif terhadap penurunan pH dan suhu tinggi jika dibandingkan dengan Annelida dan nematoda (Hale *et al.,* 2022; Ricevuto *et al.,* 2015). Beberapa penelitian telah menemukan pengasaman laut mempengaruhi reproduksi dan perkembangan fisiologis Copepoda (Fitzer *et al.,* 2012); tingkat kesuburan; motilitas dan kecepatan sperma

pada bintang laut (Uthicke *et al.,* 2013); perubahan metabolism aktivitas dan komposisi asam lemak pada siput predator (Valles Regino *et al.,* 2015); modifikasi laju respirasi pada karang (L. *pertusa*) dan mengubah kapasitas metabolisme dan waktu reproduksi pada ikan di Antartika (**Gambar 7.4**). Toleransi terhadap pengasaman laut dapat berbeda antar spesies dari tingkat trofik yang berbeda (mempengaruhi interaksi antar spesies dan mengubah stabilitas komunitas secara langsung atau tidak langsung melalui perubahan ketersediaan sumber daya. Campanati *et al.,* 2018 menemukan bahwa tingkat pH 7,4 tidak berpengaruh signifikan terhadap kematian, abnormalitas, atau pertumbuhan larva tiram batu (*Saccostrea cucullate*), tetapi "meningkatkan angka kematian (hingga 30%), abnormalitas (hingga 60%) dan sekitar 3 kali lebih tinggi tingkat metabolisme" pada larva predator utamanya. McCormick *et al.,* 2013 menemukan kebalikan dalam persaingan ruang pada dua spesies ikan, (*Pomacentrus moluccensis*) dan (P. *amboinensis*) pada kondisi CO^2 yang tinggi, sementara Range *et al.,* 2010 menemukan peningkatan kelangsungan hidup pada kerang juvenil (*Ruditapes decussatus*) sebagai respons terhadap pengasaman laut.



Gambar 7.4 Dampak asidifikasi laut pada ikan

(Sumber: Valles Regino *et al.,* 2015)

Efek gabungan dari pemanasan laut dan pengasaman dapat mempengaruhi proses seperti kalsifikasi, nekrosis dan disolusi. Kematian alga koral (*Lithophyllum cabiochae*), yang disebabkan oleh kematian jaringan dan disolusi tulang meningkat 2−3 kali lipat pada pCO_2 dan suhu tinggi, Pengasaman dan pemanasan laut dapat berdampak keanekaragaman hayati laut dengan mempengaruhi keanekaragaman spesies, kelimpahan, deteksi predator dan distribusi. Pengasaman juga mengurangi jumlah sulfur yang mengalir keluar dari laut ke atmosfer, di mana mereka dioksidasi untuk membentuk $SO4^{2-}$. Hal ini mengurangi pantulan radiasi sinar matahari kembali ke luar angkasa, sehingga mengakibatkan pemanasan global yang lebih besar lagi dengan konsekuensi yang lebih parah bagi komponen laut termasuk keanekaragaman hayati.

Gambar 7.5 Pemutihan pada karang

(Sumber: Graham *et al.,* 2006)

Kombinasi tekanan pengasaman laut dan pemanasan laut dapat membatasi ruang lingkup aklimatisasi kutub. Misalnya, suhu yang lebih hangat telah dikaitkan dengan modifikasi gen ekspresi pada pteropoda Antartika. Terumbu karang sangat rentan terhadap pemanasan dan pengasaman laut (**Gambar 7.5**), membahayakan pertumbuhan karang dan melemahkan basis terumbu karang dan menurunkan efektivitasnya,

berdampak negatif terhadap kesehatan dan kelangsungan hidup rekrutmen dan mengurangi kinerja metabolisme ekosistem. Spesies yang terbiasa dengan fluktuasi lingkungan yang luas seperti kumpulan batuan alam (terdiri dari alga koral, alga berdaging, dan pemakan rumput) akan memiliki keuntungan fisiologis untuk mengatasi berbagai pemicu stres seperti pengasaman dan pemanasan laut.

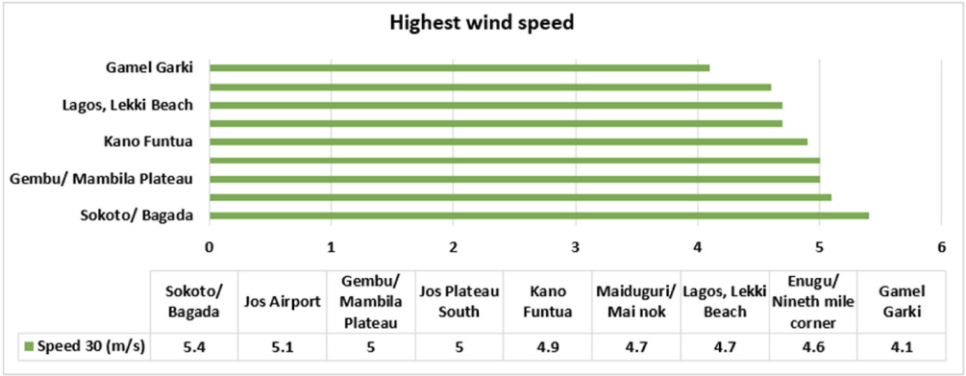
7.1.1 Rekayasa Lingkungan dalam Penanganan Perubahan Iklim

Energi terbarukan (*Renewable Energy*) merupakan sumber energi yang tersedia secara alami dan dapat mencukupi selama masa hidup manusia dan dapat digunakan untuk tujuan yang bermanfaat. Contoh sistem RE ini mencakup sumber daya tenaga surya, angin, air, panas bumi, dan biomassa. Sumber energi ini terisi kembali dengan cepat, dan tingkat konsumsinya sedikit atau tidak berpengaruh pada ketersediaannya (Kehinde *et al.,* 2018). Sumber daya energi terbarukan bisa digunakan untuk menghasilkan listrik dan panas dengan menggunakan berbagai konversi teknologi dan dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi manusia. Saat ini, negara-negara sebagian besar bergantung pada bahan bakar fosil seperti minyak, batu bara, dan gas alam untuk keperluan energi. Namun hal ini mempunyai beberapa kelemahan. Bahan bakar fosil mengeluarkan sejumlah besar gas rumah kaca selama penggunaannya untuk pembangkit energi dan telah diidentifikasi sebagai fasilitator utama perubahan iklim. Kedua, penggunaan bahan bakar fosil mengakibatkan polusi berat terhadap lingkungan yang berasal dari emisi pembakaran NOx, SOx dan partikulat selama pemanfaatan bahan bakar fosil di boiler.

Selain itu, bahan bakar fosil tidak selalu tersedia. Ini adalah sumber daya yang terbentuk selama ribuan tahun dan tidak bisa diperbaharui jika penggunannya terus meningkat. Fosil bahan bakar hampir habis, meskipun ada penemuan baru dan perkembangan dalam eksplorasi dan teknologi ekstraksi; faktanya tetap saja permintaan energi yang meningkat akan menghabiskan sumber daya fosil lebih cepat dari yang direncanakan. Dengan adanya fenomena perubahan iklim, kita membutuhkan lingkungan yang bebas polusi dan jaminan keamanan energi masa depan. Banyak negara kini mencari alternatif energi yang

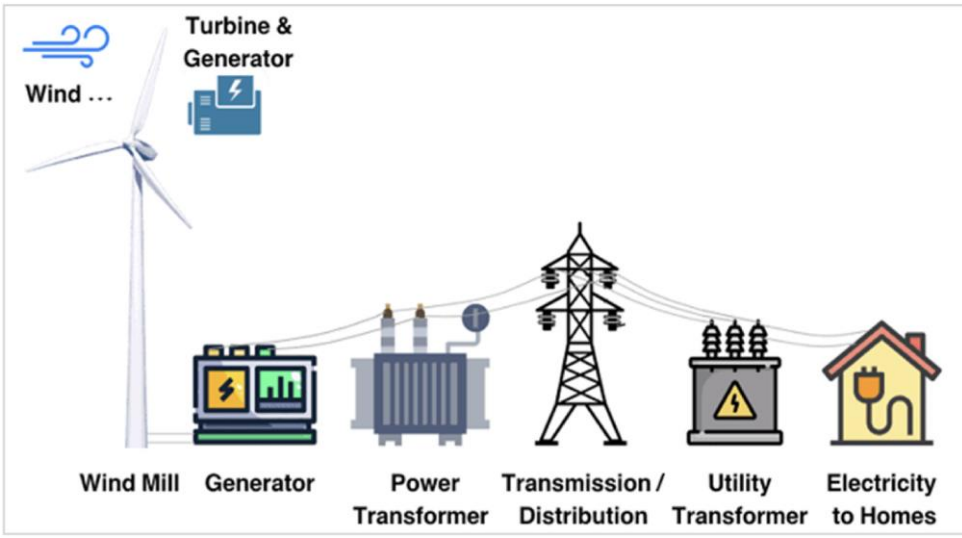
lebih bersih dan berkelanjutan daripada bahan bakar fosil dan sumber daya energi terbarukan akan lebih bermanfaat (Shaaban & Petinrin, 2014). Energi terbarukan sangat melimpah dan berkelanjutan dengan sedikit atau tanpa emisi polutan dan gas rumah kaca. Penyerapan energi terbarukan akan menghilangkan ketergantungan lebih jauh pada energi konvensional sumber energi dan pada akhirnya akan meringankan beban CO_2 dan gas rumah kaca lingkungan.

Teknologi energi angin memanfaatkan energi kinetik angin untuk menghasilkan listrik (**Gambar 7.6**). Angin disebabkan oleh beberapa fenomena, seperti pemanasan diferensial udara atmosfer oleh matahari yang sedemikian rupa sehingga kepadatan udara yang berkurang akan naik ke atas udara yang lebih padat karena penyerapan panas, topografi permukaan yang bervariasi dan rotasi bumi. Pemanenan tenaga angin paling populer teknologinya adalah turbin angin modern (**Gambar 7.7**) di mana energi pada angin menyebabkan berputarnya turbin angin yang pada akhirnya terhubung ke generator untuk membangkitkan listrik. Pada generator listrik, energi mekanik diubah menjadi energi listrik dengan melakukan konversi elektromagnetik lapangan. Dalam desain turbin angin modern, sensor digunakan untuk melacak arah angin sehingga turbin terputar menghadap langsung ke angin yang masuk untuk pembangkitan listrik yang lebih efisien. Perlindungan kecepatan tinggi juga dipadukan dengan menggunakan rem *cut-off* untuk melindungi turbin saat beroperasi karena melebihi kecepatan tinggi ambang desain sistem.



Gambar 7.6 Daerah dengan kecepatan angin tinggi di Nigeria

(Sumber: Bamisile *et al.*, 2017)



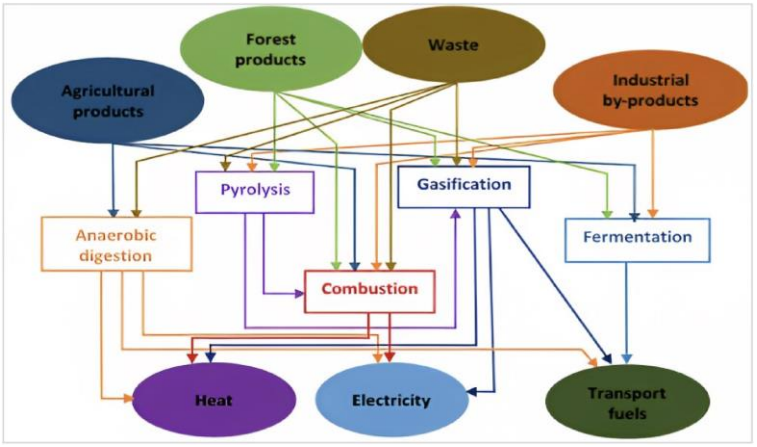
Gambar 7.7 Struktur bagian dalam turbin angin

(Sumber: www.electricaltechnology.org)

Biomassa dalam berbagai bentuknya dapat diubah menjadi listrik atau bentuk energi lainnya atau bahan bakar yang lebih mudah digunakan, ditangani, disimpan, atau dipindahkan. Penggunaan biomassa untuk membangkitkan energi didorong oleh kebutuhan untuk mengurangi peningkatan pemanasan global karena karbon emisinya rendah atau nol. Biomassa tanaman seperti sisa tanaman, limbah kayu dan bentuk lainnya biasanya melimpah di pedesaan wilayah Nigeria dan dapat dimanfaatkan dengan menggunakan listrik yang sedikit dan medium dalam rangka memberi daya pada area ini. Memanfaatkan biomassa untuk energi akan mengurangi kemungkinan pelepasan metana dalam jumlah besar dari pembusukan biomassa ke atmosfer, menghilangkan kegiatan menimbun limbah pertanian dan membebaskan lahan yang seharusnya digunakan untuk pembuangan limbah.

Konversi biomassa memerlukan penggunaan beragam teknologi konversi, banyak di antaranya masih dalam tahap pengembangan, tetapi banyak juga yang masih dalam tahap pengembangan yang cukup matang untuk menghasilkan energi yang efisien dan sudah digunakan. Teknologi konversi biomassa yang tersedia dapat dikelompokkan menjadi dua kategori; teknologi konversi biokimia seperti pencernaan anaerobik yang

lebih cocok untuk biomassa basah dan termokimia teknologi konversi yang dimaksudkan untuk mengubah biomassa menjadi kering (Obada *et al.,* 2023; Adam *et al.,* 2018). Teknologi populer di kalangan teknologi termokimia adalah gasifikasi, pirolisis, dan pembakaran. Dalam tenaga konvensional biomassa tanaman, biomassanya digunakan sendiri atau dibakar bersama dengan bahan bakar fosil lainnya. **Gambar 7.8** menunjukkan proses yang terlibat dalam konversi biomassa untuk membangkitkan energi.

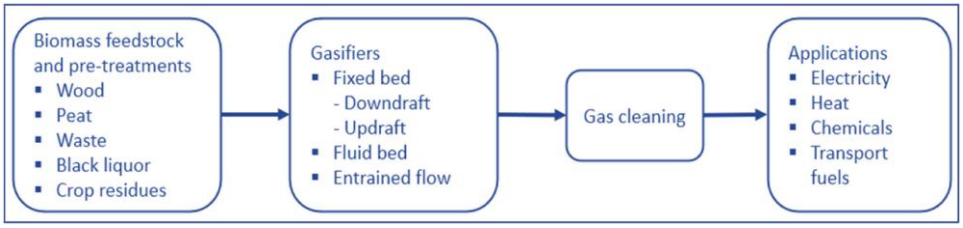


Gambar 7.8 Konversi biomassa untuk pembangkit energi

(Sumber: Ojo *et al.,* 2020)

Biomassa gasifikasi melibatkan pemanasan biomassa kering dalam gasifier dengan suplai pasokan oksigen terbatas pada suhu tinggi untuk menghasilkan gas yang mudah terbakar yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik (Abouemara *et al.,* 2024). Gasifikasi menggunakan udara untuk mengubah bahan organik dalam bahan baku biomassa menjadi gas yang mudah terbakar dan mengubah nilai kalor bahan baku energi menjadi pembawa energi (Singh *et al.,* 2023). Pembangkit listrik gasifikasi telah digunakan di sebagian besar negara berkembang untuk elektrifikasi pedesaan. **Gambar 7.9** memperlihatkan diagram blok gasifikasi biomassa untuk pembangkit tenaga listrik. Pada dasarnya, prosesnya dimulai dengan produksi biomassa, dikumpulkan, dan kemudian diangkut ke fasilitas penyimpanan. Kedua, biomassa

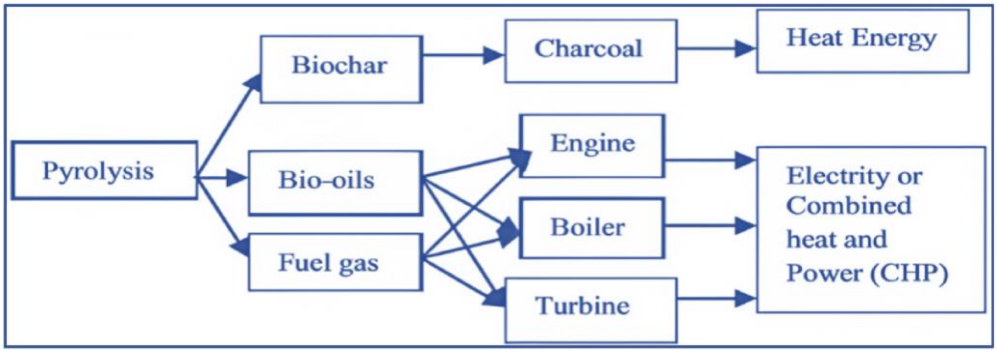
diolah terlebih dahulu, setelah itu digasifikasi untuk menghasilkan gas produser. Gas produser yang dihasilkan kemudian dibersihkan dari kotoran dan siap digunakan sistem pembangkit tenaga listrik.



Gambar 7.9 Proses gasifikasi

(Sumber: Ogbonnaya *et al.*, 2019)

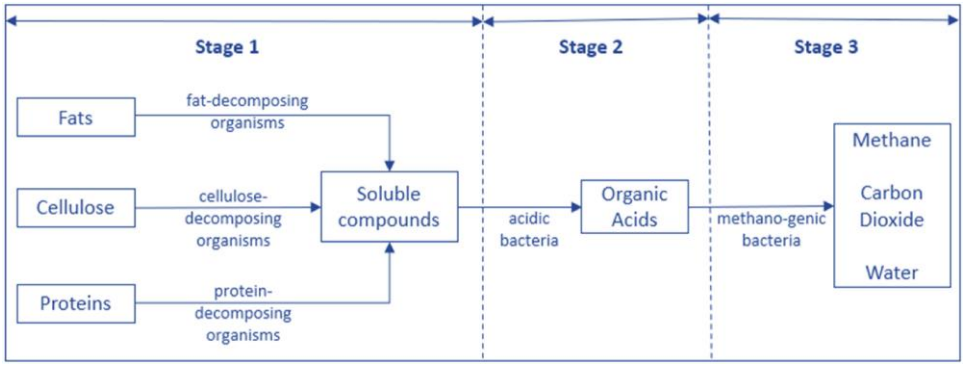
Pirolisis adalah sub-proses di gasifikasi biomassa dan dapat digunakan secara mandiri untuk produksi bio-oil, bahan bakar gas dan biochar dengan memanaskan biomassa kering dalam sebuah reaktor pada berbagai kondisi suhu, laju pemanasan, periode retensi dan ukuran partikel. Pirolisis adalah salah satunya teknologi konversi termokimia yang menjanjikan untuk pertanian limbah biomassa. Prosesnya cukup fleksibel dan dianggap ramah lingkungan untuk teknologi. Bio-oil yang dihasilkan dari proses ini bisa lebih lanjut diolah dan ditingkatkan menjadi alternatif yang cocok untuk bahan bakar minyak bumi, dapat digunakan sebagai bahan bakar transportasi dan untuk menghasilkan panas dan listrik di pembangkit listrik (**Gambar 7.10**).



Gambar 7.10 Proses pirolisis

(Sumber: Mohammed *et al.*, 2017)

Pencernaan anaerobik mengacu pada generasi biogas dari bahan tanaman atau kotoran hewan dengan mencernanya pada tingkat rendah oksigen. Mikroorganisme sudah terbiasa menguraikan bahan organik untuk menghasilkan biogas yang dapat dimanfaatkan dalam menghasilkan panas dan listrik atau diproses lebih lanjut untuk menghasilkan bahan bakar lainnya. Mikroorganisme ini biasanya berupa bakteri yang bertindak secara bertahap untuk mereduksi molekul kompleks ke yang bentuk yang lebih sederhana seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 7.11**. Biogas, terutama dari CH_4 dan CO_2 yang dapat diproses lebih lanjut agar sesuai pembakaran dalam turbin gas dan mesin pembakaran internal lainnya menghasilkan panas dan listrik.



Gambar 7.11 Pencernaan anaerobik

(Sumber: Diji, 2013)

Bab 8

MANAJEMEN ENERGI TERBARUKAN

8.1 Pendahuluan

Di tengah tantangan yang dihadapi planet kita, seperti perubahan iklim serta pencemaran udara, sumber energi yang terbarukan (EBT) muncul sebagai tawaran salah satu opsi yang prospektif. EBT menawarkan harapan kehidupan selanjutnya yang lebih bersih dan berkelanjutan, memainkan peran krusial dalam pengelolaan lingkungan hidup kita. Salah satu kontribusi terbesar EBT adalah kemampuannya meredupsi emisi gas rumah kaca (GRK). Berbeda dengan energi konvensional seperti batubara dan minyak bumi yang melepaskan emisi GRK secara signifikan (IPCC, 2021), EBT seperti tenaga surya dan angin menghasilkan emisi minimal, bahkan tidak sama sekali. Hal ini terbukti melalui laporan terupdate dari Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021) bahwa [1] yang menegaskan peran penting EBT dalam memerangi perubahan iklim dan pemanasan global. Selain mengurangi jejak karbon, EBT juga berkontribusi terhadap kualitas udara yang lebih baik. Pembangkit listrik berbahan bakar fosil kerap melepaskan polutan berbahaya seperti nitrogen oksida dan sulfur oksida. Sebaliknya, EBT, seperti yang dilaporkan oleh International Energy Agency (IEA, 2023) [2], tidak menghasilkan polusi udara, sehingga menciptakan lingkungan yang lebih sehat bagi masyarakat.

Manfaat EBT tidak berhenti sampai di situ. Mereka juga berperan penting dalam melestarikan sumber daya alam yang terbatas. Tidak sama dengan energi konvensional yang menguras cadangan bahan bakar fosil, EBT memanfaatkan sumber daya alam yang terbarukan, seperti sinar

matahari juga angin. Ini memastikan keberlanjutan atas energi untuk generasi mendatang. Tak hanya itu, EBT juga membantu mencegah kerusakan lingkungan. Energi konvensional seringkali menghasilkan limbah yang mengandung bahaya di mana bersifat mencemari medianya seperti tanah maupun air. Sebaliknya, EBT, seperti yang telah kita bahas, tidak menghasilkan limbah berbahaya, sehingga melindungi ekosistem yang ada. Sebagai contoh, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menggunakan energi yang dipancarkan dari matahari sebagai sumberdaya yang melimpah ruah untuk menghasilkan listrik tanpa emisi GRK dan polusi udara. Demikian pula Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang memanfaatkan energi angin untuk menghasilkan listrik bersih. Bahkan, Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), meskipun menghasilkan emisi GRK yang rendah, tetap menjadi pilihan alternatif karena nampak bersahabat dengan alam bila dikomparasikan dengan penghasil listrik yang menggunakan bahan bakar minyak. Sumber energi terbarukan memegang peranan penting dalam pengelolaan lingkungan hidup yang berkelanjutan. Dengan mengurangi emisi GRK, meningkatkan kualitas udara, melestarikan sumber daya alam, dan mencegah kerusakan lingkungan, EBT menawarkan jalan keluar dari krisis lingkungan yang kita hadapi saat ini. Mendorong penggunaan EBT secara luas menjadi langkah krusial untuk mencapai masa depan yang cerah bagi planet kita.

Sumber energi pada umumnya seperti batu bara maupun minyak bumi, ataupun gas alam, telah menjadi tulang punggung peradaban modern selama berabad-abad. Namun, penggunaan energi ini telah membawa konsekuensi serius bagi lingkungan, mengantarkan bumi pada jurang krisis ekologi dan perubahan iklim yang kian memprihatinkan. Pemanfaatan energi konvensional menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK) seperti karbon dioksida (CO2), metana (CH4), dan nitrogen oksida (NOx) dalam jumlah besar (Arya, 2023; Soerjadi, 2022). Emisi ini memicu pemanasan global, yang berakibat pada naiknya permukaan laut, perubahan pola cuaca ekstrem, dan bencana alam yang semakin sering terjadi (Arya, 2023).

Dampak lingkungan lainnya tak kalah mengkhawatirkan. Pencemaran udara akibat emisi gas buang kendaraan dan industri

berbahan bakar fosil memicu kabut asap dan hujan asam, yang membahayakan kesehatan manusia dan merusak ekosistem (Soerjadi, 2022). Limbah industri energi konvensional, seperti air asam dari penambangan batu bara, mencemari air tanah dan sungai, membahayakan flora dan fauna. Eksplorasi dan eksploitasi sumber energi ini juga mengakibatkan deforestasi dan kerusakan habitat alami, mengganggu keseimbangan ekologis (Arya, 2023). Penggunaan energi konvensional yang terus-menerus juga menguras sumber daya alam yang tidak terbarukan. Deplesi sumber daya alam ini akan semakin memperparah krisis energi di masa depan (Soerjadi, 2022). Fakta-fakta ini menunjukkan bahwa penggunaan energi konvensional tidak berkelanjutan dan mengancam masa depan bumi. Transisi menuju energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan menjadi solusi mendesak untuk mengatasi krisis ini.

Tren penggunaan energi terbarukan di tingkat global dan nasional menunjukkan pertumbuhan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Hal ini membawa angin segar bagi upaya pelestarian lingkungan dan penanggulangan krisis iklim. Secara global, International Renewable Energy Agency (IRENA) memperkirakan bahwa pangsa energi terbarukan dalam bauran energi global mencapai 27,3% pada tahun 2022 (IRENA, 2023).

Pertumbuhan ini didorong oleh berbagai faktor, seperti penurunan biaya teknologi energi terbarukan, meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan dari energi fosil, dan kebijakan pemerintah yang mendukung transisi energi. Di tingkat nasional, Indonesia juga menunjukkan komitmennya untuk meningkatkan bauran energi terbarukan. Dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030, pemerintah menargetkan bauran energi terbarukan mencapai 23% pada tahun 2030 (Kementerian ESDM, 2021). Untuk mencapai target tersebut, pemerintah telah melakukan berbagai upaya, seperti pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

Penggunaan energi terbarukan, seperti matahari, angin, air, dan panas bumi, memiliki banyak manfaat bagi lingkungan. Energi terbarukan tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK), seperti karbon dioksida (CO_2), yang berkontribusi pada pemanasan global dan perubahan iklim (IRENA, 2023). Selain itu, energi terbarukan juga membantu mengurangi pencemaran udara dan air. Contohnya, penggunaan panel surya dan turbin angin tidak menghasilkan emisi gas buang yang mencemari udara, dan penggunaan PLTP tidak menghasilkan limbah cair yang mencemari air (Arya, 2023). Pemanfaatan energi terbarukan juga dapat membantu meningkatkan ketahanan energi dan kemandirian negara. Diversifikasi sumber energi dengan memanfaatkan energi terbarukan memiliki keunggulan berupa keberdayaan dan kemandirian energi karena adanya varian pilihan energi yang dapat memecah titik konsentrasi permintaan terhadap sumber energi andalan yang diklaim memiliki deposit yang terbatasdi mana harganya semakin mahal (Soerjadi, 2022). Meskipun terdapat beberapa tantangan dalam pengembangan energi terbarukan, seperti biaya yang masih relatif tinggi dan intermittensi energi, tren penggunaannya terus meningkat dengan berbagai inovasi teknologi dan kebijakan yang mendukung. Hal ini memberikan harapan baru bagi kehidupan berikutnya yang lebih alami dan dapat terwariskan bagi generasi-generasi berikutnya (Uddin et al., 2023).

Landasan hukum dan kebijakan terkait energi terbarukan merupakan elemen fundamental dalam mendorong transisi energi ramah lingkungan. Regulasi yang tepat, seperti insentif pajak dan tarif feed-in, tidak hanya efektif menarik investasi swasta, tetapi juga memicu percepatan pembangunan infrastruktur dan peningkatan kapasitas energi terbarukan, berkontribusi pada kemandirian energi nasional (REN21, 2023). Namun, regulasi yang lemah dapat menghambat kemajuan dan bahkan menimbulkan konsekuensi negatif seperti perubahan penggunaan lahan dan polusi air (WWF, 2023).

Oleh karena itu, perumusan dan penerapan regulasi yang komprehensif dan mempertimbangkan dampak lingkungan menjadi esensial. Regulasi yang dirancang dengan baik, seperti yang ditegaskan European Commission (European Commission, 2023), mampu

memaksimalkan manfaat dan meminimalkan risiko energi terbarukan, mengantarkan transisi energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Selain itu, penting untuk mendorong inovasi teknologi energi terbarukan, seperti yang disarankan World Bank (World Bank, 2023), untuk meningkatkan efisiensi, daya saing, dan keberlanjutan jangka panjangnya. Teknologi canggih memungkinkan pemanfaatan sumber daya energi terbarukan yang lebih beragam dan tersebar, seperti energi geothermal dan gelombang laut. Dengan regulasi yang tepat dan komprehensif, energi terbarukan berpotensi menjadi solusi untuk mengatasi krisis energi, perubahan iklim, dan menjadi pendorong pembangunan berkelanjutan. Investasi dalam energi terbarukan tidak hanya berdampak positif pada lingkungan, tetapi juga membuka peluang penciptaan lapangan kerja di sektor teknologi hijau, serta berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi yang inklusif dan berkelanjutan, hal ini memastikan kehidupan bagi generasi berikutnya yang lebih alami, sekaligus mewujudkan keadilan lingkungan dan keadilan antar generasi (Subhan et al., 2024).

8.2 Pengertian Dan Jenis Energi Terbarukan

Energi mengacu terhadap terbatasnya sumber tenaga yang sangat dibutuhkan dalam menggerakan mesin-mesin pendukung kehidupan manusia. Karakteristik utama dari energi terbarukan adalah kemampuannya untuk diperbaharui melalui proses alamiah, seperti matahari yang terus-menerus memancarkan energi surya, angin yang tercipta oleh perbedaan suhu di atmosfer bumi, serta energi air yang dihasilkan melalui aliran sungai atau gelombang laut. Sifat terbarukan ini menjadikan energi tersebut sebagai alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan dibandingkan dengan sumber energi fosil yang terbatas dan berkontribusi pada emisi gas rumah kaca. Selain itu, energi terbarukan memiliki karakteristik non-polutan yang mengurangi dampak negatif terhadap kualitas udara dan lingkungan secara keseluruhan. Keberagaman sumber energi terbarukan juga memungkinkan adanya integrasi teknologi yang berbeda-beda, seperti panel surya untuk menghasilkan listrik, turbin angin untuk pembangkit listrik, serta pembangkit listrik tenaga air untuk memenuhi kebutuhan energi secara berkelanjutan (Stefenon et al., 2024).

Terdapat beberapa jenis energi terbarukan, antara lain:

1. Tenaga air, merupakan salah satu jenis energi terbarukan yang diperoleh dari pergerakan air, baik dalam bentuk aliran sungai, arus laut, maupun gelombang laut. Energi ini dapat dikonversi menjadi energi melalui mesin pembangkit energi tenaga hidro (PLTA) maupun tenaga ombak (PLTO), di mana tenaga hidro dihasilkan dari gerakan kinetik aliran air, sementara PLTO menggunakan gerakan gelombang laut untuk menggerakkan generator. Tenaga air dianggap sebagai sumber energi yang bersih dan dapat diandalkan, serta memiliki potensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi dunia secara berkelanjutan (Stefenon et al., 2024).
2. Panas bumi, merupakan salah satu jenis energi terbarukan yang diperoleh dari panas dalam bumi yang dihasilkan oleh radioaktifitas dan panas residual dari pembentukan planet. Terdapat beberapa teknologi yang digunakan untuk mengekstraksi energi panas bumi, termasuk pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) dan reaksi panas dari geotermal di mana penggunaan uap panas air yang diinjeksikan dari pengumpul panas dari dalam bumi yang untuk selanjutnya membuat mesin generator elektrik serta turbin menjadi bergerak, sementara pemanasan geotermal mengalirkan air panas langsung dari reservoir ke permukaan untuk memanaskan bangunan atau digunakan dalam proses industri. Energi panas bumi memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan yang dapat diprediksi dan dapat diperbaharui secara alami (Elkezza et al., 2022).
3. Biomassa, merupakan jenis energi terbarukan yang dihasilkan dari bahan organik, seperti limbah pertanian, limbah hutan, sisa-sisa makanan, dan biomassa energi yang ditanam khusus seperti tanaman energi. Proses konversi biomassa menjadi energi meliputi pembakaran langsung untuk menghasilkan panas atau listrik, produksi biofuel seperti bioetanol dan biodiesel, serta penggunaan biogas dari limbah organik melalui fermentasi anaerobik. Biomassa sendiri merupakan salah satu alternatif energi dengan karakter yang dapat diperbaharui secara alami dan berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca dengan memanfaatkan bahan

organik yang dapat diuraikan kembali ke dalam siklus alam (Vento et al., 2024).

4. Tenaga surya merupakan jenis energi terbarukan yang dihasilkan dari sinar matahari yang diterima oleh panel surya dan diubah menjadi listrik melalui proses fotovoltaik. Selain itu, tenaga surya juga dapat dimanfaatkan untuk pemanasan air melalui panel surya termal. Teknologi fotovoltaik mengonversi energi surya menjadi listrik melalui efek fotolistrik pada sel surya, sedangkan panel surya termal memanfaatkan energi panas dari sinar matahari untuk memanaskan air atau fluida lainnya. Energi surya merupakan sumber energi yang bersih, dapat diperbaharui secara alami, serta memiliki potensi besar untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca (Zele et al., 2024).
5. Tenaga angin merupakan jenis energi terbarukan yang berasal dari gerakan udara. Menggunakan mesin yang terdiri atas turbin dengan berpenggerak angin lalu kemudian menjadi energi kinetik yang berasal dari angin hingga menjadi energi mekanik, yang lalu ditransmisikan sebagai listrik melalui perantaraan generator. Turbin angin dapat dipasang di darat atau di laut, tergantung pada lokasi dan kebutuhan energi. Angin adalah salah satu sumber energi yang aman bagi lingkungan, tidak menyisakan residu yang berbahaya bagi kesehatan makhluk hidup serta tidak mendatangkan kerusakan bagi alam, dan juga memiliki potensi besar untuk menyediakan pasokan energi yang stabil dan terjangkau di berbagai wilayah (García et al., 2024).
6. Energi laut mencakup berbagai jenis energi terbarukan yang berasal dari pergerakan air laut, termasuk panas laut, gelombang laut, dan pasang surut. Panas laut diekstraksi melalui perbedaan suhu antara lapisan air yang berbeda di laut dapat menciptakan zat uap air yang dapat menggerakan mesin turbin hingga akhirnya memercikan listrik yang dihantarkan memenuhi kebutuhan listrik manusia. Gelombang laut dimanfaatkan dengan menggunakan alat seperti pembangkit listrik tenaga ombak (PLTO) yang menangkap energi kinetik dari gelombang laut untuk menghasilkan listrik. Sementara itu, pasang

surut memanfaatkan pergerakan air laut yang terjadi akibat tarikan gravitasi bulan dan matahari untuk menghasilkan energi listrik melalui turbin air. Keberagaman sumber energi laut ini menjadikannya sebagai potensi yang besar untuk menyediakan sumber energi terbarukan yang bersih dan dapat diandalkan di masa depan (Miller, 2018).

7. Hidrogen sebagai energi terbarukan yang dihasilkan dari pemecahan molekul air atau sumber-sumber lainnya menggunakan energi terbarukan seperti tenaga surya atau angin. Proses produksi hidrogen ini biasanya melibatkan elektrolisis air atau pemrosesan biomassa. Hidrogen dapat disimpan dan diangkut dalam bentuk gas atau cair, kemudian digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan listrik melalui sel bahan bakar atau dapat digunakan dalam proses industri sebagai bahan kimia. Hidrogen sebagai energi terbarukan mempunyai daya pakai yang potensial dalam menciptakan kemandirian energi serta mengimbangi efek rumah kaca sebagai perusak atmosfer (Zhou et al., 2024).

8.3 Prinsip dan Teknologi Memanfaatan Energi Terbarukan

Energi terbarukan yang di dalamnya termasuk hidro, surya, geotermal, dan juga angin adalah solusi kunci dalam menghadapi tantangan energi global. Teknologi yang terus berkembang memungkinkan penggunaan sumber daya alam yang tak terbatas ini secara efisien dan bersih. Dengan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, energi terbarukan membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan polusi udara. Ini bukan hanya tentang memenuhi kebutuhan energi saat ini, tetapi juga tentang menjaga planet ini untuk generasi masa depan. Investasi dan inovasi dalam energi terbarukan penting untuk menciptakan dunia yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Liang et al., 2024). Berikut Gambaran umum prinsip kerja dan teknologi pemanfaatan dari setiap jenis energi terbarukan, antara lain:

1. Tenaga Air (Hidroenergi). Teknologi ini memiliki prinsip kerja yang berasal dari aliran air, baik dari sungai, air terjun, atau bendungan. Air yang mengalir dipakai untuk memutar turbin yang terhubung ke

generator listrik. Pembangkit listrik tenaga air menggunakan turbin air yang mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanis. Energi mekanis tersebut kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator (Shen et al., 2016).

2. Panas Bumi (Geotermal). Teknologi ini memiliki prinsip kerja dengan pemanfaatan energi panas yang disimpan di dalam bumi. Air atau uap panas diekstraksi dari reservoir geotermal di dalam bumi dan digunakan untuk menghasilkan listrik. Pembangkit listrik geotermal menggunakan sumur bor untuk mengakses reservoir panas bumi. Air atau uap yang dihasilkan kemudian dipakai untuk memutar turbin yang terhubung ke generator listrik (Yang et al., 2024).
3. Biomassa. Teknologi ini menjalankan prinsip kerja berbasis bahan organik yang dapat digunakan sebagai sumber energi contohnya sisa produksi pada lahan pertanian, biomassa dalam bentuk konsentrat tinggi, serta residu pertukangan kayu. Biomassa sendiri dibakar demi menciptakan kalor panas atau dapat pula dikonversi menjadi gas ataupun bahan bakar dalam bentuk cair. Teknologi termal, seperti pembakaran langsung, atau proses kimia dan biologi, seperti pirolisis atau fermentasi, digunakan untuk mengkonversi biomassa menjadi energi termal, listrik, atau bahan bakar transportasi (Li et al., 2024).
4. Tenaga Surya (Solar). Teknologi ini memanfaatkan sumberdaya sinar matahari yang diubah menjadi listrik menggunakan sel surya (solar cells) yang terbuat dari material semikonduktor. Sel surya menangkap sinar matahari dan menghasilkan arus listrik melalui efek fotovoltaik. Sistem surya termal juga digunakan untuk menghasilkan panas dengan menyerap sinar matahari (Çelik & McInnes, 2024).
5. Tenaga Angin (Angin). Teknologi ini memanfaatkan energi kinetik angin yang menggerakkan turbin angin. Turbin tersebut mengubah energi angin menjadi energi mekanis yang kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Turbin angin modern terdiri dari bilah-bilah yang dipasang pada poros. Ketika angin melewati bilah-bilah ini, energi kinetik angin diubah menjadi putaran pada poros turbin yang terhubung ke generator (Sun et al., 2023).

6. Energi Laut. Teknologi ini memanfaatkan potensi perbedaan suhu, arus laut, dan gelombang laut. Contoh teknologi pemanfaatan termasuk pembangkit listrik ombak dan pembangkit listrik arus pasang surut. Pembangkit listrik ombak sendiri menggunakan gerakan gelombang laut untuk memutar turbin yang terhubung ke generator listrik. Pembangkit listrik arus pasang surut memanfaatkan perbedaan tinggi air antara pasang dan surut untuk menghasilkan energi (Majidi Nezhad et al., 2024).
7. Hidrogen. Teknologi ini menjadi sumber energi jika dihasilkan secara bersih, misalnya dari elektrolisis air menggunakan listrik terbarukan. Hidrogen kemudian dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam berbagai aplikasi, termasuk kendaraan listrik bertenaga baterai hidrogen. Elektrolisis air menggunakan listrik untuk memisahkan molekul air menjadi hidrogen dan oksigen. Hidrogen yang dihasilkan kemudian disimpan dan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk sebagai bahan bakar.

Dalam rekayasa tenaga air (hidroenergi), fokus utama adalah pada desain bendungan, turbin, dan pengelolaan aliran air untuk meminimalkan dampak lingkungan. Untuk energi geotermal, pengeboran sumur dan pengelolaan reservoir panas bumi menjadi kunci dalam mencegah kerusakan lingkungan. Teknologi konversi termal dan fermentasi biomassa dalam biomassa memerlukan pengelolaan limbah yang efektif untuk mengurangi emisi dan pencemaran. Selanjutnya, dalam rekayasa tenaga surya, desain sel surya dan efisiensi modul sangat penting, sementara studi siklus hidup produk diperlukan untuk memahami dampak lingkungan secara menyeluruh. Pada tenaga angin, desain turbin harus memperhitungkan interaksi dengan satwa liar dan infrastruktur. Untuk energi laut, evaluasi dampak pada ekosistem laut dan migrasi ikan penting dipertimbangkan. Terakhir, produksi hidrogen memerlukan pemantauan emisi dan efisiensi produksi yang ketat untuk meminimalkan dampak lingkungan. Dengan memperhatikan aspek ini, pengembangan energi terbarukan dapat dilakukan secara bertanggung jawab, menjaga keseimbangan antara pemenuhan kebutuhan energi dan pelestarian lingkungan (Çelik & McInnes, 2024; Li et al., 2024; Liang et al.,

2024; Majidi Nezhad et al., 2024; Shen et al., 2016; Sun et al., 2023; Yang et al., 2024).

8.4 Aspek Perencanaan Dan Pengembangan Energi Terbarukan

Dalam proses perencanaan dan pengembangan proyek energi terbarukan, beberapa tahap kunci harus dilalui dengan cermat. Pertama, studi kelayakan dan analisis lingkungan hidup (AMDAL) menjadi langkah awal yang penting. Melalui AMDAL, dampak lingkungan dari proyek tersebut dievaluasi dengan cermat untuk memastikan bahwa langkah-langkah mitigasi yang tepat dapat diimplementasikan. Setelah itu, pemilihan teknologi dan lokasi menjadi faktor penentu. Berbagai faktor, termasuk ketersediaan sumber daya alam, infrastruktur yang ada, dan dampak sosial ekonomi, harus dipertimbangkan dengan seksama. Selanjutnya, pembiayaan proyek menjadi aspek krusial. Sumber dana yang cukup diperlukan untuk memastikan kelancaran pembangunan dan operasionalisasi proyek. Terakhir, perizinan dan aspek legal menjadi tahap yang tak bisa diabaikan. Proses perolehan izin yang tepat, serta pemahaman mendalam terhadap regulasi dan persyaratan hukum yang berlaku, menjadi kunci kesuksesan dalam menjalankan proyek energi terbarukan. Keseluruhan proses ini membutuhkan kerjasama antara pemangku kepentingan dan otoritas terkait, serta komitmen yang kuat terhadap prinsip-prinsip keberlanjutan dan pelestarian lingkungan (Kindo et al., 2024).

Studi kelayakan dan analisis lingkungan hidup (AMDAL) merupakan tahap kritis dalam perencanaan dan pengembangan proyek energi terbarukan. AMDAL bertujuan untuk menyelidiki potensi dampak proyek terhadap lingkungan, sosial, dan ekonomi, serta mengidentifikasi langkah-langkah mitigasi yang diperlukan. Proses ini melibatkan analisis mendalam terhadap berbagai faktor, seperti penggunaan lahan, pengaruh terhadap ekosistem lokal, ketersediaan air, dan kualitas udara. Selain itu, dampak sosial dan ekonomi juga dievaluasi, termasuk implikasi terhadap komunitas lokal, ketenagakerjaan, dan ekonomi regional. Melalui konsultasi dengan berbagai pihak terkait, seperti pemerintah, masyarakat lokal, dan organisasi lingkungan, AMDAL memastikan bahwa kepentingan semua pemangku kepentingan dipertimbangkan dengan cermat. Hasil dari

AMDAL memberikan dasar yang kuat untuk pengambilan keputusan yang berkelanjutan, memastikan bahwa proyek energi terbarukan dapat beroperasi dengan meminimalkan dampak negatif dan maksimal memberikan manfaat positif bagi lingkungan dan masyarakat sekitarnya. Dengan demikian, AMDAL tidak hanya menjadi persyaratan hukum, tetapi juga instrumen penting dalam memastikan keberlanjutan dan kesuksesan jangka panjang dari proyek energi terbarukan (Álvarez-Álvarez et al., 2024).

Pemilihan teknologi dan lokasi adalah langkah penting dalam pengembangan proyek energi terbarukan. Proses ini melibatkan evaluasi cermat terhadap berbagai faktor, termasuk ketersediaan sumber daya alam, infrastruktur yang ada, kondisi geografis, serta dampak sosial dan lingkungan. Pemilihan teknologi harus mempertimbangkan efisiensi, ketersediaan bahan baku, dan kemampuan adaptasi terhadap lingkungan lokal. Selain itu, lokasi proyek harus dipilih dengan bijaksana, dengan memperhatikan keseimbangan antara manfaat ekonomi dan dampak lingkungan serta sosial. Keterlibatan masyarakat lokal juga penting dalam proses ini, untuk memastikan bahwa kepentingan dan kebutuhan mereka dipertimbangkan dengan baik. Melalui analisis menyeluruh dan konsultasi yang inklusif, pemilihan teknologi dan lokasi yang tepat dapat memberikan dasar yang kuat untuk keberhasilan proyek energi terbarukan, memastikan bahwa proyek tersebut dapat beroperasi secara efisien, berkelanjutan, dan menciptaan kegunaan yang sangat berkontribusi terhadap kehidupan masyarakat serta lingkungan alam (Borroy Vicente et al., 2023).

Pembiayaan proyek adalah tahap krusial dalam pengembangan proyek energi terbarukan. Proses ini melibatkan identifikasi sumber dana yang cukup untuk mendukung semua tahapan proyek, mulai dari perencanaan hingga operasionalisasi. Pembiayaan dapat berasal dari berbagai sumber, termasuk investasi swasta, pinjaman bank, dana pemerintah, dan pendanaan melalui pasar modal. Evaluasi yang cermat terhadap struktur biaya proyek dan potensi pendapatan jangka panjang menjadi kunci dalam menarik minat investor dan memastikan keberlanjutan keuangan proyek. Selain itu, perencanaan keuangan yang matang juga memungkinkan pengelolaan risiko yang lebih baik dan

meminimalkan ketidakpastian selama masa pembangunan dan operasional proyek. Kerjasama dengan lembaga keuangan, pemerintah, dan pemangku kepentingan lainnya diperlukan untuk menyusun struktur pembiayaan yang optimal dan memastikan kesuksesan proyek energi terbarukan dalam jangka panjang. Dengan pembiayaan yang cukup dan strategi keuangan yang tepat, proyek energi terbarukan dapat dikembangkan secara efisien dan berkelanjutan, memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan yang signifikan bagi masyarakat dan generasi mendatang (Benavides-Franco et al., 2023).

Perizinan dan aspek legal adalah tahapan penting dalam pengembangan proyek energi terbarukan. Proses ini melibatkan pemenuhan semua persyaratan hukum dan regulasi yang berlaku sebelum, selama, dan setelah pembangunan proyek. Langkah ini mencakup perolehan izin lingkungan, izin konstruksi, serta persetujuan dari otoritas terkait dan pemerintah setempat. Evaluasi mendalam terhadap regulasi lingkungan, lahan, dan hukum properti juga penting untuk memastikan kepatuhan dan penghindaran risiko hukum yang tidak diinginkan. Selain itu, proses perizinan dan legalitas ini juga memerlukan konsultasi yang baik dengan pemangku kepentingan, termasuk masyarakat lokal dan organisasi lingkungan, untuk memahami kekhawatiran mereka dan memastikan dukungan yang cukup untuk proyek tersebut. Kerjasama dengan pengacara ahli hukum lingkungan dan perizinan diperlukan untuk memastikan bahwa semua proses perizinan berjalan lancar dan sesuai dengan hukum yang berlaku (Benavides-Franco et al., 2023; Borroy Vicente et al., 2023; Hassanzadegan & Mooi, 2023). Dengan memperhatikan semua aspek hukum dan perizinan yang relevan, proyek energi terbarukan dapat dijalankan dengan lancar dan meminimalkan risiko hukum yang mungkin timbul, sehingga memastikan keberlanjutan operasional dan kegunaan dalam waktu yang lama kepada berbagai pihak yang bersinggungan.

8.5 Integrasi dan Pengelolaan Sistem Energi Terbarukan

Integrasi energi terbarukan yang untuk selanjutnya disebut ET ke dalam sistem kelistrikan yang ada merupakan sebuah langkah krusial dalam transisi menuju keberlanjutan energi. Hal ini, meskipun

menghadirkan kompleksitas dan tantangan, menawarkan peluang signifikan untuk membangun masa depan yang lebih bersih dan berkelanjutan. Sistem kelistrikan tradisional dirancang untuk mengelola sumber energi konvensional seperti batubara dan gas alam, yang memiliki karakteristik stabil dan dapat diprediksi. Sebaliknya, ET seperti matahari dan angin memiliki sifat intermitten, yang berarti produksinya berfluktuasi tergantung pada kondisi cuaca dan waktu. Fluktuasi ini dapat menyebabkan ketidakseimbangan dalam sistem kelistrikan, sehingga menimbulkan risiko pada stabilitas dan keandalan jaringan. Mengatasi tantangan integrasi ET memerlukan strategi dan teknologi inovatif. Salah satu solusinya adalah penyimpanan energi. Teknologi seperti baterai dan pumped-hydro storage dapat menyimpan energi berlebih yang dihasilkan saat produksi ET tinggi, dan melepaskannya saat dibutuhkan untuk menyeimbangkan jaringan. Smart grid juga memainkan peran penting dalam integrasi ET. Dengan menggunakan teknologi digital dan komunikasi canggih, smart grid memungkinkan sistem kelistrikan untuk beradaptasi secara real-time dengan fluktuasi produksi ET (Mirza et al., 2024). Hal ini meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas jaringan, dan memungkinkan pengelolaan sumber energi yang lebih optimal.

Sistem mikrogrid menawarkan solusi terdesentralisasi untuk mengintegrasikan ET. Mikrogrid adalah jaringan listrik lokal yang mandiri, yang dapat beroperasi secara independen dari jaringan utama. Mikrogrid dapat menggabungkan berbagai sumber energi, termasuk ET, dan menyediakan energi yang andal untuk komunitas lokal. Tantangan integrasi ET tidak hanya bersifat teknis. Faktor ekonomi, sosial, dan politik juga perlu dipertimbangkan. Biaya awal untuk membangun infrastruktur ET dan teknologi terkait masih relatif tinggi. Diperlukan kebijakan yang mendukung dan insentif yang menarik untuk mendorong investasi dan pengembangan ET. Peningkatan kesadaran publik tentang manfaat ET dan pentingnya transisi energi juga penting untuk membangun dukungan dan partisipasi masyarakat. Meskipun terdapat berbagai tantangan, integrasi ET ke dalam sistem kelistrikan menawarkan banyak peluang. ET dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan memerangi perubahan iklim. Diversifikasi sumber energi

meningkatkan ketahanan energi dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Selain itu, pengembangan ET dapat menciptakan lapangan kerja baru dan mendorong pertumbuhan ekonomi. Dengan strategi dan teknologi yang tepat, serta komitmen dari berbagai pihak, integrasi ET dapat menjadi kunci untuk mencapai masa depan energi terwariskan kepada generasi selanjutnya serta pro kepada terciptanya lingkungan yang lestari (Babaei et al., 2024).

Penyimpanan energi, smart grid, dan sistem mikrogrid merupakan tiga solusi utama dalam mengatasi tantangan teknis dalam integrasi energi terbarukan ke dalam sistem kelistrikan yang ada. Penyimpanan energi memainkan peran penting dalam menyediakan solusi untuk fluktuasi dalam produksi energi terbarukan. Dengan teknologi penyimpanan energi yang canggih, seperti baterai lithium-ion dan sistem penyimpanan termal, energi yang dihasilkan dari sumber-sumber terbarukan seperti tenaga surya dan angin dapat disimpan saat produksinya berlebih dan dilepaskan ke jaringan saat dibutuhkan. Hal ini mengatasi tantangan ketidakpastian produksi dan memungkinkan penggunaan energi terbarukan secara lebih efisien. Selain itu, smart grid memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi untuk meningkatkan pengelolaan dan distribusi energi. Dengan smart grid, jaringan listrik dapat secara dinamis mengatur pasokan dan permintaan energi berdasarkan fluktuasi produksi energi terbarukan dan kebutuhan konsumen. Ini membantu mengoptimalkan penggunaan energi secara keseluruhan, meningkatkan efisiensi sistem, dan mengurangi biaya operasional. Sementara itu, sistem mikrogrid menawarkan solusi yang lebih terdesentralisasi dan adaptif. Mikrogrid adalah jaringan listrik terdistribusi yang dapat beroperasi secara mandiri atau terhubung dengan jaringan listrik utama. Dengan mikrogrid, produksi dan konsumsi energi dapat lebih terintegrasi di tingkat lokal, memungkinkan penggunaan energi terbarukan dalam skala yang lebih kecil dan meningkatkan keandalan sistem. Dengan menerapkan strategi dan teknologi ini secara luas, integrasi energi terbarukan dapat dilakukan dengan lebih efektif, mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional dan mempercepat peralihan menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan. Namun, meskipun memiliki potensi besar,

penerapan penyimpanan energi, smart grid, dan sistem mikrogrid masih menemui pelbagai hambatan. Di antara hambatan yang menjadi momok yakni biaya tinggi dan kurangnya infrastruktur yang diperlukan. Pengembangan teknologi yang lebih murah dan skalabel serta investasi dalam infrastruktur yang diperlukan akan menjadi kunci untuk mempercepat adopsi solusi ini. Selain itu, diperlukan juga dukungan kebijakan yang kuat dari pemerintah dan kerjasama antar pemangku kepentingan untuk menciptakan lingkungan yang mendukung bagi pengembangan dan implementasi teknologi ini. Dengan melakukan hal ini, kita dapat menciptakan sistem energi lestari serta menjamin kehidupan alam dan masyarakat hingga masa-masa yang akan datang (Lee et al., 2024).

8.6 Dampak Lingkungan Dan Sosial Ekonomi Dari Pemanfaatan Energi Terbarukan

Pemanfaatan energi terbarukan berkontribusi secara positif terhadap lingkungan dan sosial ekonomi. Secara lingkungan, energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, dan hidroenergi memiliki potensi untuk meredupsi residu polusi udara, emisi rumah kaca, meminimalkan daya tekan terhadap alam, serta meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem dan keanekaragaman hayati. Namun, pembangunan infrastruktur energi terbarukan juga dapat memengaruhi lingkungan, terutama melalui pembangunan lahan dan gangguan terhadap habitat alami. Secara sosial ekonomi, pemanfaatan energi yang terbarukan membuat kesempatan bekerja dan sumber pemasukan dalam bidang energi tersebut, kemudian mendukung pertumbuhan ekonomi lokal, dan meningkatkan kemandirian terhadap sumber energi lokal. Namun, dampak sosial juga perlu diperhatikan, seperti pengaruh terhadap komunitas lokal, hak tanah, dan keadilan sosial. Oleh karena itu, penilaian dampak lingkungan dan sosial ekonomi yang komprehensif serta partisipasi masyarakat yang kuat diperlukan untuk memastikan bahwa pemanfaatan energi terbarukan dilakukan secara berkelanjutan, meminimalkan dampak negatif dan memaksimalkan manfaat bagi lingkungan dan masyarakat secara keseluruhan (Ferreira et al., 2022).

Strategi mitigasi dan pengelolaan dampak negatif merupakan pendekatan yang penting dalam menghadapi berbagai tantangan, baik dalam konteks lingkungan, sosial, maupun ekonomi. Untuk mengurangi

dampak negatif, perencanaan yang matang dan implementasi tindakan yang tepat diperlukan. Ini melibatkan identifikasi potensi risiko dan ancaman, serta penyusunan rencana untuk mengurangi atau menghilangkan dampaknya. Dalam konteks lingkungan, strategi mitigasi sering melibatkan praktik-praktik berkelanjutan misalnya pemanfaatan sumber energi dengan bijak, tata kelola residu, serta konservasi habitat. Di bidang sosial, pendekatan seperti program-program pendidikan, kesetaraan, dan inklusi dapat membantu mengurangi disparitas dan ketidaksetaraan yang berpotensi menciptakan dampak negatif. Sementara itu, dalam aspek ekonomi, diversifikasi ekonomi, penciptaan lapangan kerja, dan perlindungan sosial dapat membantu mengurangi kerentanan terhadap krisis ekonomi dan dampak sosial yang merugikan. Selain itu, upaya untuk membangun kapasitas masyarakat lokal dalam menghadapi risiko dan bencana juga merupakan bagian integral dari strategi mitigasi dan pengelolaan dampak negatif. Ini melibatkan edukasi, pelatihan, serta pengembangan infrastruktur yang tahan terhadap bencana. Dengan mengadopsi strategi ini, masyarakat dapat menjadi lebih tangguh dan dapat mengatasi tantangan dengan lebih baik, sehingga menciptakan lingkungan yang lebih berkelanjutan, sosial yang lebih adil, dan ekonomi yang lebih stabil (Yan et al., 2024).

Potensi penciptaan lapangan kerja dan manfaat sosial ekonomi lainnya merupakan aspek penting dalam strategi mitigasi dan pengelolaan dampak negatif. Melalui penciptaan lapangan kerja, strategi ini tidak hanya membantu mengurangi tingkat pengangguran tetapi juga meningkatkan kesejahteraan masyarakat secara keseluruhan. Peluang kerja yang tercipta bisa berasal dari berbagai sektor, termasuk sektor manufaktur, teknologi, pariwisata, dan pertanian, tergantung pada kebutuhan lokal dan potensi ekonomi suatu wilayah. Dengan adanya lapangan kerja baru, pendapatan masyarakat meningkat, yang pada gilirannya dapat meningkatkan daya beli dan konsumsi barang dan jasa lokal. Selain itu, penciptaan lapangan kerja juga berkontribusi pada peningkatan kesejahteraan sosial, dengan memberikan kesempatan yang lebih luas bagi individu untuk meraih kemandirian ekonomi dan meningkatkan taraf hidup mereka serta keluarga mereka. Ini juga dapat mengurangi tingkat kemiskinan dan ketidaksetaraan sosial, karena lebih banyak orang memiliki akses ke sumber daya dan peluang yang setara. Penciptaan lapangan kerja memiliki dampak yang luas dan signifikan

dalam berbagai aspek pembangunan suatu negara. Selain manfaat langsungnya dalam bentuk lapangan kerja dan pendapatan bagi individu, hal ini juga memberikan kontribusi yang penting dalam pembangunan infrastruktur, pendidikan, dan kesehatan.

Salah satu dampak positif yang terlihat adalah peningkatan dalam pembangunan infrastruktur. Dengan adanya lebih banyak orang yang bekerja, pemerintah memiliki lebih banyak sumber daya untuk mengalokasikan dana ke proyek-proyek infrastruktur yang penting bagi pertumbuhan ekonomi. Misalnya, dengan pendapatan yang meningkat, pemerintah dapat memperbaiki jalan, jembatan, dan sarana transportasi lainnya, yang pada gilirannya akan memperbaiki konektivitas dan aksesibilitas bagi masyarakat serta mendorong pertumbuhan ekonomi lokal. Selain itu, peningkatan pendapatan juga memungkinkan pemerintah untuk lebih banyak berinvestasi dalam sektor pendidikan. Dana tambahan yang diperoleh dari pajak dan pendapatan kerja dapat dialokasikan untuk meningkatkan kualitas pendidikan, seperti memperbarui fasilitas sekolah, melatih guru, dan menyediakan bantuan pendidikan bagi siswa yang membutuhkan.

Dengan demikian, penciptaan lapangan kerja tidak hanya memberikan manfaat ekonomi jangka pendek, tetapi juga memperkuat fondasi pembangunan jangka panjang melalui peningkatan akses dan mutu pendidikan. Selanjutnya, peningkatan pendapatan juga dapat mendukung sektor kesehatan masyarakat. Pemerintah memiliki lebih banyak sumber daya untuk mengalokasikan dana ke layanan kesehatan dasar, membangun fasilitas kesehatan yang lebih baik, dan memberikan akses yang lebih luas terhadap layanan kesehatan yang berkualitas. Hal ini dapat mengurangi beban penyakit yang dapat dicegah dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat secara keseluruhan, sehingga penciptaan lapangan kerja tidak hanya memiliki manfaat ekonomi langsung bagi individu, tetapi juga memiliki dampak yang luas dalam memperbaiki infrastruktur, pendidikan, dan kesehatan masyarakat secara keseluruhan. Melalui investasi yang tepat dan dukungan yang berkelanjutan, penciptaan lapangan kerja dapat menjadi salah satu pendorong utama bagi pembangunan yang berkelanjutan dan inklusif. Dengan demikian, strategi mitigasi dan pengelolaan dampak negatif yang menekankan penciptaan lapangan kerja tidak hanya memberikan manfaat ekonomi tetapi juga meningkatkan kesejahteraan sosial dan

memperkuat ketahanan masyarakat terhadap berbagai risiko dan tantangan ekonomi (Alam et al., 2022; Colombo et al., 2020; Félix et al., 2023; Kayima et al., 2023; Maziliauske, 2024; Obaideen et al., 2023; Vo et al., 2023).

8.7 Kesimpulan Dan Pandangan Kedepan

Dalam tulisan ini hendak mengemukakan urgensi transisi menuju sumber energi yang berkelanjutan dalam mengatasi tantangan perubahan iklim dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Melalui pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti matahari, angin, air, biomassa, dan lain sebagainya, kita dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan memperbaiki kualitas lingkungan. Kesimpulan ini juga menyoroti peran penting teknologi dan kebijakan dalam mendorong adopsi energi terbarukan secara luas. Dengan demikian, pandangan ke depan menunjukkan bahwa masih ada banyak pekerjaan yang harus dilakukan. Kita perlu terus mengembangkan teknologi yang lebih efisien dan ekonomis untuk energi terbarukan, serta menyusun kebijakan yang mendukung investasi dan pertumbuhan sektor ini. Berdasarkan hal tersebut kita dapat mempercepat transisi menuju masa depan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan, sambil memperluas akses energi yang terjangkau dan dapat diandalkan bagi semua orang.

Prospek pengembangan dan pemanfaatan energi terbarukan dalam konteks pengelolaan lingkungan secara berkelanjutan menjanjikan dampak yang signifikan bagi masa depan planet ini. Dengan mengandalkan sumber energi yang terbarukan seperti matahari, angin, air, dan biomassa, kita dapat memperbaiki keseimbangan ekologis, mengurangi jejak karbon, serta memitigasi dampak negatif perubahan iklim. Potensi energi terbarukan sangat besar, dengan teknologi yang terus berkembang dan semakin terjangkau. Selain itu, investasi yang terus meningkat dalam infrastruktur energi terbarukan telah membuka peluang baru untuk pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan. Namun, tantangan-tantangan pun tidak bisa diabaikan. Pengembangan energi terbarukan masih dihadapkan pada hambatan teknis, seperti penyimpanan energi dan efisiensi jaringan, yang memerlukan penelitian lebih lanjut dan investasi untuk diatasi. Selain itu, aspek sosial dan kebijakan juga menjadi kendala penting, seperti resistensi dari industri konvensional, perubahan kebijakan yang tidak konsisten, serta masalah

aksesibilitas dan distribusi. Sementara energi terbarukan menawarkan potensi besar untuk memperbaiki kualitas lingkungan dan meningkatkan keberlanjutan, pendekatan yang komprehensif dan kolaboratif antara pemerintah, industri, dan masyarakat akan menjadi kunci keberhasilannya. Diperlukan upaya bersama untuk mengatasi tantangan ini, dengan memperkuat regulasi yang mendukung, mengembangkan teknologi yang lebih inovatif, serta meningkatkan kesadaran dan pendidikan masyarakat tentang manfaat energi terbarukan. Dengan melakukan ini, kita dapat mengarahkan dunia menuju masa depan yang lebih hijau, bersih, dan berkelanjutan bagi generasi mendatang.

Bab 9

ETIKA DAN SOSIAL DALAM REKAYASA LINGKUNGAN

9.1 Pengantar Etika dalam Rekayasa Lingkungan

9.1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Rekayasa Lingkungan

Rekayasa lingkungan adalah cabang dari rekayasa yang fokus pada penerapan ilmu pengetahuan dan teknik untuk melindungi dan memperbaiki kualitas lingkungan alami dan membangun lingkungan yang sehat dan berkelanjutan untuk manusia (Mihelcic & Zimmerman, 2021). Disiplin ini mencakup studi, desain, dan penerapan teknologi yang mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Hal ini termasuk pengelolaan air, udara, dan limbah, serta pengembangan teknologi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Area Utama Rekayasa Lingkungan:

1. **Pengelolaan Air dan Air Limbah:** Desain dan operasi fasilitas untuk pengolahan air minum dan pengolahan air limbah. Hal ini termasuk teknologi untuk menghilangkan kontaminan, memulihkan air untuk kegunaan kembali, dan memastikan distribusi air yang aman.
2. **Pengendalian Polusi Udara:** Mengembangkan metode untuk mengurangi emisi berbahaya dari industri, kendaraan, dan sumber lainnya. Ini bisa termasuk segalanya dari filter dan scrubbers di cerobong asap hingga strategi untuk mengurangi emisi kendaraan.
3. **Pengelolaan Limbah Padat:** Penanganan, pembuangan, dan daur ulang limbah padat. Rekayasa solusi untuk mengurangi,

memproses, dan mengubah limbah menjadi produk atau energi yang berguna.

4. **Remediasi Lingkungan:** Pembersihan dan pemulihan lokasi yang terkontaminasi, seperti tanah dan air tanah yang tercemar akibat kegiatan industri atau bocornya bahan kimia.
5. **Pengembangan Teknologi Berkelanjutan:** Inovasi dalam teknologi hijau, seperti energi terbarukan, bangunan hijau, dan transportasi berkelanjutan untuk mendukung pembangunan yang berkelanjutan.

Contoh Aplikatif:

Proyek Pengolahan Air Limbah: Sebuah kota menghadapi masalah dengan sistem pengolahan air limbah yang ketinggalan zaman yang tidak lagi mampu memenuhi standar regulasi baru untuk pengolahan air. Rekayasa lingkungan digunakan untuk merancang dan membangun fasilitas pengolahan air limbah baru yang tidak hanya memenuhi atau melebihi standar ini tetapi juga mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi pengolahan air. Fasilitas baru ini menggunakan teknologi seperti biofilter, membran mikrofiltrasi, dan sistem pengolahan lumpur yang menghasilkan biogas sebagai sumber energi terbarukan. Ini menunjukkan bagaimana rekayasa lingkungan tidak hanya menyelesaikan masalah langsung tetapi juga memperkenalkan solusi berkelanjutan yang memiliki manfaat jangka panjang untuk masyarakat dan lingkungan.

Melalui contoh ini dan definisi yang luas, jelas bahwa rekayasa lingkungan berperan kritis dalam menghadapi tantangan lingkungan global, melayani kebutuhan masyarakat, dan membantu mencapai tujuan keberlanjutan. Dengan pemahaman ini, penting bagi insinyur lingkungan untuk mengadopsi pendekatan yang etis dan bertanggung jawab dalam setiap proyek yang mereka tangani, memastikan bahwa mereka tidak hanya memecahkan masalah teknis tetapi juga mempertimbangkan dampak sosial dan lingkungan dari tindakan mereka.

9.1.2 Pengenalan Etika Profesional

Etika profesional dalam rekayasa lingkungan menyangkut prinsip-prinsip moral dan standar perilaku yang harus diikuti oleh insinyur saat merancang, melaksanakan, dan mengelola proyek yang berdampak pada lingkungan (Van & Royakkers, 2023). Etika ini tidak hanya membimbing mereka dalam membuat keputusan yang adil dan bertanggung jawab, tetapi juga dalam menegakkan integritas profesi dan menjaga kepercayaan publik.

Prinsip Etika Profesional Utama:

1. **Integritas:** Insinyur harus jujur dan imparsial, dan selalu bertindak dengan keadilan tanpa penipuan.
2. **Keadilan:** Mereka harus berusaha untuk bersikap adil dan memperlakukan semua pihak dengan keadilan, menghindari diskriminasi.
3. **Keandalan dan Akuntabilitas:** Bertanggung jawab atas pekerjaan mereka dan hasilnya, serta memenuhi standar profesional yang tinggi.
4. **Kelestarian:** Mengutamakan kesejahteraan lingkungan dan masyarakat dalam pekerjaan mereka, berusaha untuk memberikan solusi yang berkelanjutan.
5. **Kesehatan dan Keselamatan:** Memastikan bahwa kesehatan dan keselamatan masyarakat tidak terganggu oleh proyek atau praktik rekayasa.

Contoh Aplikatif:

Kasus Sungai Terkontaminasi: Sebuah perusahaan rekayasa lingkungan dipekerjakan untuk mengatasi pencemaran di sungai yang diakibatkan oleh bocornya bahan kimia dari pabrik terdekat. Prinsip etika profesional berperan ketika insinyur melakukan penilaian yang akurat terhadap tingkat pencemaran dan kemungkinan dampaknya terhadap ekosistem lokal dan kesehatan masyarakat. Mereka harus jujur dalam melaporkan temuan mereka kepada otoritas lokal dan publik, bahkan jika informasi tersebut mungkin tidak menguntungkan klien yang membayar

jasa mereka. Integritas membutuhkan mereka untuk tidak meremehkan masalah atau mengubah data untuk menyenangkan klien atau menghindari konfrontasi publik.

Dalam proses penyelesaian, insinyur memutuskan untuk menggunakan teknologi bioremediasi yang tidak hanya efektif mengurangi kontaminan tetapi juga minim dampak negatif terhadap lingkungan dibandingkan metode kimiawi. Keputusan ini menunjukkan komitmen mereka terhadap kelestarian dan tanggung jawab etis untuk mencari solusi yang paling menguntungkan bagi masyarakat dan lingkungan. Di samping itu, insinyur juga harus memastikan transparansi dalam komunikasi mereka dengan masyarakat lokal, menjelaskan langkah-langkah yang diambil dan dampak yang diharapkan secara jujur, serta menjawab pertanyaan atau kekhawatiran yang mungkin muncul. Dengan demikian, insinyur tidak hanya memenuhi tanggung jawab teknis mereka tetapi juga menjaga kepercayaan dan keamanan masyarakat.

Dengan mengikuti prinsip-prinsip etika profesional ini, insinyur lingkungan dapat memperkuat reputasi mereka sebagai profesional yang dapat dipercaya dan meningkatkan kontribusi positif mereka terhadap masyarakat dan lingkungan. Etika profesional, oleh karena itu, tidak hanya penting untuk kesuksesan individual dalam karir tetapi juga penting untuk keberlanjutan dan integritas seluruh profesi rekayasa lingkungan.

9.1.3 Pentingnya Etika dalam Rekayasa Lingkungan

Etika dalam rekayasa lingkungan adalah suatu keharusan, bukan pilihan (Rolston, 2020). Dalam konteks rekayasa lingkungan, etika membimbing insinyur untuk beroperasi dengan cara yang tidak hanya memenuhi standar teknis tetapi juga menghormati dan melindungi kepentingan masyarakat dan lingkungan. Etika ini sangat penting karena proyek rekayasa seringkali memiliki konsekuensi langsung dan signifikan terhadap sumber daya alam, kesehatan manusia, dan kualitas hidup.

Kegunaan Etika dalam Rekayasa Lingkungan:

1. **Membangun Kepercayaan Publik:** Kepercayaan publik adalah aset penting bagi setiap profesi. Dalam rekayasa lingkungan,

publik harus percaya bahwa insinyur mengambil keputusan yang mengutamakan kesejahteraan umum, tidak hanya kepentingan ekonomi (Treves dkk., 2017).

2. **Menjamin Keberlanjutan:** Etika membantu insinyur mengambil keputusan yang mendukung pembangunan berkelanjutan, memastikan bahwa sumber daya alam digunakan dengan cara yang menjaga kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka (Litvinenko dkk., 2022).
3. **Menghindari Konflik dan Kerusakan:** Mematuhi prinsip etis dapat mencegah proyek dan praktek yang mungkin menimbulkan risiko serius bagi lingkungan dan masyarakat, menghindari litigasi, dan kerugian finansial yang besar.
4. **Pendorong Inovasi:** Etika sering mendorong insinyur untuk mencari solusi kreatif dan inovatif yang meminimalisir dampak negatif atau meningkatkan manfaat positif proyek mereka (Dreyer dkk., 2017).

Contoh Aplikatif:

Kasus Pemulihan Area Terkontaminasi: Sebuah perusahaan rekayasa diberikan tugas untuk membersihkan sebuah area yang terkontaminasi oleh limbah berbahaya. Dalam kasus ini, etika profesional menuntut insinyur untuk melakukan penilaian menyeluruh terhadap teknik pemulihan yang paling efektif dan aman. Mereka memilih untuk tidak menggunakan teknik yang lebih cepat dan murah yang mungkin memberikan dampak jangka pendek tetapi menyebabkan masalah lingkungan jangka panjang. Sebaliknya, mereka memilih metode yang lebih ramah lingkungan, meskipun mungkin lebih mahal dan memakan waktu lebih lama. Keputusan ini didasarkan pada prinsip keberlanjutan dan tanggung jawab sosial.

Selain itu, insinyur juga melibatkan masyarakat lokal dalam proses keputusan, menjaga transparansi tentang risiko dan manfaat dari berbagai pilihan pemulihan. Komunikasi yang jujur dan terbuka ini membangun kepercayaan dalam masyarakat bahwa proyek tersebut dijalankan dengan mempertimbangkan kepentingan terbaik mereka. Melalui contoh ini, dapat dilihat bahwa etika dalam rekayasa lingkungan

memainkan peranan penting dalam memandu insinyur untuk beroperasi tidak hanya dengan pertimbangan teknis tetapi juga moral. Etika membantu memastikan bahwa semua proyek tidak hanya berhasil dari segi teknis tetapi juga mendatangkan manfaat maksimal bagi masyarakat dan lingkungan tanpa kompromi pada masa kini atau masa depan. Keberhasilan ini, pada gilirannya, mendukung legitimasi dan integritas seluruh profesi.

9.1.4 Tinjauan Singkat Sejarah Etika dalam Rekayasa

Sejarah etika dalam rekayasa memberikan wawasan penting tentang bagaimana pemahaman dan aplikasi prinsip etis telah berkembang dalam respons terhadap tantangan teknologi dan masyarakat (Catalano, 2022). Dari awal perkembangannya, etika dalam rekayasa telah berkembang untuk mengatasi masalah kompleks yang berkaitan dengan perkembangan teknologi, keselamatan publik, dan tanggung jawab sosial.

Evolusi Etika dalam Rekayasa:

1. **Awal Abad 20:** Pada awal abad ke-20, fokus utama etika rekayasa adalah pada integritas profesional dan jujur dalam praktek rekayasa. Misalnya, setelah bencana jembatan Quebec pada tahun 1907, yang menyebabkan kematian 75 pekerja konstruksi karena kegagalan struktural, industri rekayasa menekankan pentingnya standar keselamatan dan tanggung jawab profesional dalam desain dan konstruksi.
2. **Tengah Abad 20:** Seiring dengan perang dunia kedua dan kemajuan dalam teknologi, etika rekayasa mulai melihat isu-isu yang lebih kompleks seperti penggunaan teknologi dalam perang dan dampak lingkungan dari kegiatan industri. Insiden seperti bencana Minamata pada 1950-an, di mana merkuri dibuang ke perairan Jepang menyebabkan keracunan massal, memicu pemikiran lebih dalam tentang tanggung jawab lingkungan dan kesehatan publik.
3. **Akhir Abad 20 dan Awal Abad 21:** Perkembangan kesadaran lingkungan dan keberlanjutan menjadi pusat perhatian. Bencana

Chernobyl pada tahun 1986 dan bencana Exxon Valdez pada tahun 1989 menunjukkan kebutuhan untuk lebih memperhatikan risiko lingkungan dan etika dalam pengambilan keputusan teknis. Ini mengarah pada integrasi etika lingkungan lebih dalam ke dalam pendidikan dan praktek rekayasa.

Contoh Aplikatif:

Bencana Love Canal: Pada akhir 1970-an, kasus Love Canal di Niagara Falls, NY, menjadi salah satu contoh paling terkenal dari kegagalan etis dalam rekayasa dan manajemen limbah industri. Perusahaan Hooker Chemical telah membuang 21.000 ton limbah beracun ke kanal yang kemudian dikembangkan menjadi perumahan. Penghunian area tersebut menyebabkan penyakit dan cacat kelahiran yang meluas karena paparan limbah kimia. Insiden ini memicu perubahan besar dalam peraturan lingkungan di Amerika Serikat, termasuk pengesahan Superfund Act yang bertujuan untuk membersihkan situs limbah berbahaya dan mengatur tanggung jawab untuk pencemaran.

Love Canal adalah titik balik yang menyoroti pentingnya etika lingkungan dalam rekayasa dan pentingnya pertimbangan etis dalam pengambilan keputusan teknologi dan manajerial (Newman, 2016). Kejadian ini memperkuat kebutuhan untuk etika yang menyeluruh dan terintegrasi dalam semua aspek rekayasa, menunjukkan bahwa tanggung jawab insinyur tidak hanya terbatas pada keberhasilan teknis tetapi juga pada kesejahteraan masyarakat dan keberlanjutan lingkungan. Sejarah ini menunjukkan bagaimana setiap kejadian signifikan telah membantu membentuk pemahaman dan aplikasi etika dalam rekayasa, mengarahkan profesinya untuk lebih memperhitungkan konsekuensi sosial dan lingkungan dari tindakan teknis.

9.2. Prinsip Etika dan Tanggung Jawab Sosial

9.2.1 Prinsip-prinsip Etika dalam Rekayasa

Prinsip-prinsip etika dalam rekayasa lingkungan membentuk dasar bagi pengambilan keputusan dan perilaku insinyur di lapangan (Zhu & Jesiek, 2017). Prinsip-prinsip ini dirancang untuk memandu

insinyur agar bertindak secara bertanggung jawab, memperhatikan keadilan, kebenaran, dan kepentingan masyarakat serta lingkungan. Berikut adalah prinsip-prinsip etika utama dalam rekayasa, dengan penjelasan dan contoh aplikatifnya:

1. **Kewajiban untuk Melindungi Keselamatan, Kesehatan, dan Kesejahteraan Masyarakat:** Insinyur harus selalu menempatkan keselamatan dan kesehatan masyarakat sebagai prioritas utama dalam pekerjaan mereka (Leveson, 2016). Prinsip ini menuntut insinyur untuk menghindari tindakan yang bisa membahayakan masyarakat dan lingkungan.

   Contoh: Seorang insinyur lingkungan bekerja pada desain sistem pembuangan limbah industri. Mereka menemukan bahwa desain yang lebih murah akan berisiko lebih besar terhadap kontaminasi air tanah. Berdasarkan prinsip etika ini, insinyur tersebut memilih untuk merancang sistem yang sedikit lebih mahal namun jauh lebih aman untuk kesehatan masyarakat sekitar.

2. **Integritas dan Kejujuran:** Insinyur harus jujur dan adil dalam semua praktik profesional mereka dan mengharapkan kejujuran dari orang lain. Mereka tidak boleh menipu, memalsukan, atau menyesatkan (Davis, 2017).

   Contoh: Insinyur yang memimpin proyek remediasi lingkungan harus menyajikan data yang akurat mengenai tingkat polusi dan efektivitas metode yang diusulkan tanpa meremehkan risiko atau melebih-lebihkan keefektifan teknik yang digunakan.

3. **Pertanggungjawaban dan Keandalan:** Insinyur harus bertanggung jawab atas pekerjaan mereka dan siap mempertanggungjawabkan semua keputusan dan tindakan mereka (Ryan, 2020). Mereka harus memastikan bahwa semua pekerjaan yang mereka lakukan atau supervisi sesuai dengan standar profesional.

   Contoh: Jika sebuah proyek konstruksi mengalami kegagalan struktur dan menyebabkan kerusakan atau cedera, insinyur yang bertanggung jawab harus menghadapi penyelidikan dan

menyediakan semua dokumen dan bukti yang relevan untuk audit.

4. **Keadilan:** Insinyur harus berusaha untuk beroperasi dengan adil dan tidak diskriminatif dalam semua kegiatan profesional (Scutt, 2024). Mereka harus memastikan kesempatan yang sama dan perlakuan yang adil terhadap semua individu.

   Contoh: Dalam merekrut tim untuk proyek rekayasa besar, insinyur memastikan proses seleksi yang berbasis merit tanpa diskriminasi berdasarkan ras, agama, jenis kelamin, atau latar belakang etnis.

5. **Keberlanjutan:** Insinyur harus mempromosikan dan menerapkan solusi rekayasa yang mendukung pembangunan berkelanjutan, meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan menggunakan sumber daya secara efisien (Mulder, 2017).

   Contoh: Merancang bangunan atau infrastruktur dengan memanfaatkan energi terbarukan dan material yang ramah lingkungan, serta memastikan bahwa struktur tersebut memiliki efisiensi energi yang tinggi dan dampak lingkungan yang rendah selama umur operasionalnya.

Prinsip-prinsip ini tidak hanya mengarahkan insinyur untuk berperilaku etis tetapi juga membentuk fondasi untuk membangun kepercayaan dan kredibilitas dalam profesi rekayasa. Selain itu, kepatuhan terhadap prinsip-prinsip etis ini juga penting untuk melindungi dan memajukan kepentingan masyarakat dan lingkungan secara keseluruhan.

9.2.2 Tanggung Jawab Sosial dan Lingkungan Insinyur

Tanggung jawab sosial dan lingkungan insinyur adalah komitmen untuk memastikan bahwa semua tindakan dan keputusan dalam praktek rekayasa memberikan dampak positif terhadap masyarakat dan lingkungan (Canney & Bielefeldt, 2015). Tanggung jawab ini mencakup memastikan bahwa proyek dan inovasi tidak hanya aman, efisien, dan ekonomis, tetapi juga etis dan berkelanjutan. Tanggung jawab

ini terextend dari pelaksanaan proyek rekayasa hingga cara komunikasi hasil dan dampaknya kepada publik dan pemangku kepentingan.

Aspek Penting dari Tanggung Jawab Sosial dan Lingkungan:

1. **Peningkatan Kualitas Hidup:** Insinyur bertanggung jawab untuk meningkatkan kualitas hidup melalui teknologi dan infrastruktur yang mereka kembangkan (Becker dkk., 2015). Ini termasuk menciptakan solusi yang dapat meningkatkan kesehatan, keselamatan, dan kesejahteraan umum.

   Contoh: Insinyur yang merancang sistem pengolahan air yang tidak hanya meningkatkan akses terhadap air bersih tetapi juga mengurangi energi dan biaya operasional, sehingga membuatnya lebih terjangkau dan berkelanjutan untuk komunitas yang lebih luas.

2. **Perlindungan Lingkungan:** Insinyur harus memprioritaskan perlindungan lingkungan dalam semua proyek mereka (Krishna dkk., 2017). Ini termasuk menggunakan praktik yang minim dampak, mendaur ulang bahan, dan meminimalkan jejak karbon.

   Contoh: Menggunakan bahan bangunan daur ulang dan sumber energi terbarukan dalam proyek pembangunan baru untuk mengurangi dampak lingkungan dari konstruksi.

3. **Pengembangan Berkelanjutan:** Insinyur memiliki peran penting dalam mendukung tujuan pengembangan berkelanjutan (Wu dkk., 2018). Ini berarti menerapkan solusi yang memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka.

   Contoh: Merancang bangunan yang tidak hanya hemat energi tetapi juga memiliki sistem pengelolaan limbah yang terintegrasi, yang menyediakan solusi jangka panjang untuk pengurangan limbah.

4. **Keterlibatan Masyarakat dan Pendidikan:** Insinyur harus terlibat secara aktif dalam dialog dengan masyarakat dan berkontribusi pada pendidikan publik tentang isu-isu lingkungan dan teknis (Halbe dkk., 2015).

Contoh: Menyelenggarakan workshop untuk masyarakat lokal tentang cara mengurangi penggunaan air dan energi di rumah, atau menyediakan pelatihan tentang cara memelihara infrastruktur sanitasi yang baru dibangun.

5. **Transparansi dan Akuntabilitas:** Keterbukaan dalam melaporkan dan bertanggung jawab atas dampak sosial dan lingkungan dari kegiatan rekayasa adalah kunci untuk memelihara kepercayaan publik dan integritas profesional (Bielefeldt, 2018).

   Contoh: Menyediakan akses publik ke hasil penilaian dampak lingkungan dan menjelaskan bagaimana risiko dan masalah telah ditangani dalam proyek rekayasa.

Dengan memenuhi tanggung jawab sosial dan lingkungan ini, insinyur tidak hanya menjaga kepercayaan dan dukungan dari masyarakat tetapi juga berkontribusi pada pembangunan yang lebih adil dan berkelanjutan. Ini juga menunjukkan bagaimana rekayasa, ketika dilakukan dengan prinsip etika yang kuat, dapat menjadi kekuatan yang sangat positif dalam membentuk masa depan yang lebih baik bagi semua

9.2.3 Etika, Teknologi, dan Keberlanjutan

Relasi antara etika, teknologi, dan keberlanjutan di dalam rekayasa lingkungan adalah kompleks dan kritis untuk masa depan pembangunan yang berkelanjutan. Etika dalam teknologi berfokus pada aplikasi prinsip-prinsip moral untuk memandu pengembangan dan penerapan teknologi yang berkelanjutan, sehingga tidak hanya inovatif tetapi juga bertanggung jawab dan adil (Nasibulina, 2015).

Integrasi Etika dengan Teknologi dan Keberlanjutan:

1. **Desain Berkelanjutan:** Insinyur harus memperhatikan dampak jangka panjang dari teknologi yang mereka kembangkan, memastikan bahwa desain meminimalkan kerusakan lingkungan dan dapat diintegrasikan dengan alam secara harmonis (Lei dkk., 2016).

   Contoh: Pengembangan bahan bangunan baru yang tidak hanya kuat dan ringan tetapi juga sepenuhnya dapat didaur ulang dan

memiliki emisi karbon yang rendah selama produksi. Ini menunjukkan prinsip etika yang mengutamakan keberlanjutan dan pengurangan limbah.

2. **Teknologi Energi Terbarukan:** Mengembangkan dan mengimplementasikan teknologi yang mendukung penggunaan energi terbarukan adalah kunci untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi jejak karbon global (Usman & Radulescu, 2022).

   Contoh: Rekayasa sistem panel surya yang lebih efisien yang dapat diintegrasikan ke dalam arsitektur bangunan tanpa mengganggu estetika atau fungsi, sambil memberikan solusi energi yang ramah lingkungan.

3. **Inovasi untuk Aksesibilitas:** Teknologi harus dirancang dengan mempertimbangkan aksesibilitas dan keterjangkauan sehingga manfaatnya dapat dirasakan secara luas, tanpa meninggalkan kelompok masyarakat tertentu.

   Contoh: Mengembangkan sistem penyaringan air yang sederhana dan ekonomis untuk digunakan di daerah terpencil, memungkinkan komunitas dengan sumber daya terbatas untuk mendapatkan akses ke air bersih dan aman.

4. **Etika Data dan Keamanan:** Dengan bertambahnya penggunaan teknologi digital dalam rekayasa, penting untuk memastikan bahwa data dikumpulkan, digunakan, dan dilindungi dengan cara yang etis.

   Contoh: Penerapan kebijakan privasi dan keamanan data ketat dalam sistem pengelolaan sumber daya lingkungan yang menggunakan IoT (Internet of Things) untuk memonitor kualitas air dan udara, memastikan bahwa data pribadi pengguna dilindungi dari akses tidak sah.

5. **Pendidikan dan Pelatihan:** Memastikan bahwa ada kesadaran dan pemahaman yang kuat tentang bagaimana teknologi dapat digunakan secara bertanggung jawab adalah penting. Ini

memerlukan pendidikan dan pelatihan yang luas mengenai prinsip etika dan keberlanjutan.

Contoh: Program pelatihan untuk insinyur dan desainer tentang prinsip-prinsip desain berkelanjutan dan analisis siklus hidup produk, meningkatkan kesadaran mereka tentang dampak lingkungan dari pilihan desain mereka.

Dengan mengintegrasikan etika ke dalam setiap aspek teknologi dan keberlanjutan, insinyur dapat memimpin dalam menciptakan solusi yang tidak hanya inovatif dan efisien tetapi juga adil, aman, dan baik untuk planet ini. Ini adalah pendekatan holistik yang memastikan bahwa teknologi melayani kepentingan manusia tanpa mengorbankan kebutuhan generasi mendatang atau kesehatan lingkungan kita

9.2.4 Kasus Studi: Etika dalam Manajemen Sumber Daya Air

Manajemen sumber daya air merupakan salah satu area di mana prinsip-prinsip etika sangat krusial, mengingat pentingnya air bagi kehidupan manusia dan ekosistem (Grizzetti dkk., 2016). Praktik etis dalam pengelolaan sumber daya air melibatkan pengambilan keputusan yang adil dan bertanggung jawab, memastikan akses yang adil dan berkelanjutan kepada sumber daya ini untuk semua pihak.

Pertimbangan Etis dalam Manajemen Sumber Daya Air:

1. **Keadilan dan Akses yang Setara:** Semua masyarakat harus memiliki akses yang setara ke sumber daya air bersih, tanpa diskriminasi berdasarkan lokasi geografis, status ekonomi, atau faktor sosial lainnya.
2. **Keberlanjutan:** Sumber daya air harus dikelola dengan cara yang memastikan bahwa mereka tetap tersedia untuk generasi masa depan, tanpa merusak lingkungan.
3. **Transparansi dan Partisipasi Publik:** Keputusan tentang manajemen sumber daya air harus dibuat dengan cara yang terbuka dan inklusif, dengan keterlibatan aktif dari semua pemangku kepentingan, termasuk masyarakat umum.

4. **Pertimbangan Ekologis:** Manajemen sumber daya air harus memperhatikan kebutuhan ekosistem alami dan bertujuan untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Contoh Kasus: Konflik Air di Basin Sungai

Latar Belakang: Di sebuah negara berkembang, konflik terjadi antara pertanian, kebutuhan industri, dan pemukiman terkait alokasi air dari sungai utama. Sungai tersebut adalah sumber utama untuk irigasi pertanian, air industri, dan konsumsi rumah tangga. Selama musim kemarau, air menjadi sangat terbatas, menimbulkan ketegangan antar sektor.

Analisis Etis:

- **Keadilan dan Akses yang Setara:** Prioritas harus diberikan untuk memastikan bahwa kebutuhan dasar seperti air minum dan sanitasi terpenuhi sebelum alokasi air untuk keperluan lain seperti irigasi dan industri.
- **Keberlanjutan:** Penggunaan air harus diatur untuk menghindari penurunan drastis tingkat air sungai, yang dapat mengancam kelangsungan hidup sungai dan ekosistem yang bergantung padanya.
- **Transparansi dan Partisipasi Publik:** Keputusan alokasi air harus melibatkan konsultasi dan dialog dengan semua pihak yang terpengaruh, memastikan bahwa suara masyarakat lokal dan industri sama-sama didengar.
- **Pertimbangan Ekologis:** Solusi harus mempertimbangkan dampak ekologis, seperti membatasi pengambilan air selama periode kritis untuk menjaga kesehatan ekosistem (Mishra dkk., 2021).

Solusi yang Diusulkan: Implementasi sistem kuota air yang menyesuaikan alokasi berdasarkan kebutuhan mendesak dan ketersediaan musiman. Pengenalan teknologi irigasi hemat air dan pengolahan air limbah industri untuk mengurangi konsumsi dan memperbaiki efisiensi. Pembentukan komite manajemen air yang inklusif, yang terdiri dari wakil dari sektor domestik, pertanian, industri,

dan kelompok konservasi untuk memantau situasi dan menyesuaikan kebijakan sesuai kebutuhan.

Kasus ini menggambarkan bagaimana prinsip etika dapat mengarahkan pengambilan keputusan dalam manajemen sumber daya air untuk mengatasi kebutuhan manusia dan ekosistem dengan cara yang adil dan berkelanjutan. Implementasi prinsip etika ini tidak hanya memecahkan konflik tetapi juga membangun dasar yang kuat untuk kerjasama dan kepercayaan di antara semua pemangku kepentingan

9.3. Etika Aplikatif dalam Proyek Lingkungan

9.3.1 Analisis Dampak Lingkungan dan Etika

Analisis Dampak Lingkungan (Environmental Impact Assessment, EIA) adalah proses sistematis untuk menilai efek potensial suatu proyek pada lingkungan fisik, biologis, sosial, dan ekonomi sebelum keputusan proyek dibuat (Yousefi dkk., 2015). Proses EIA bertujuan untuk memastikan bahwa aspek lingkungan dan sosial dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan, sehingga mengurangi dampak negatif dan memaksimalkan manfaat positif.

Contoh: Proyek pembangunan bendungan baru di sebuah sungai besar memerlukan EIA yang mendalam. EIA tersebut mengidentifikasi bahwa pembangunan bendungan akan berdampak pada habitat ikan lokal dan mengakibatkan relokasi beberapa komunitas. Berdasarkan hasil EIA, proyek tersebut memodifikasi desain bendungan untuk menyertakan sistem saluran bagi ikan dan program relokasi yang memberikan kompensasi yang adil dan dukungan bagi masyarakat yang terkena dampak.

9.3.2 Etika dalam Pengelolaan Limbah

Etika dalam pengelolaan limbah berkaitan dengan tanggung jawab moral dalam mengelola limbah dari kegiatan industri, domestik, atau pertanian agar tidak mencemarkan lingkungan atau membahayakan kesehatan publik (Raimi dkk., 2019). Praktik etis termasuk mengurangi produksi limbah, mempromosikan daur ulang, dan memastikan pembuangan limbah yang aman.

Contoh: Perusahaan kimia mengimplementasikan strategi "zero waste" yang bertujuan untuk mengurangi limbah berbahaya. Ini melibatkan teknologi canggih untuk memurnikan limbah cair dan mengubahnya menjadi produk yang bisa digunakan, seperti memanfaatkan sisa proses untuk membuat pupuk. Selain itu, semua limbah padat diolah untuk daur ulang dan digunakan kembali dalam produksi.

9.3.3 Tanggung Jawab dalam Rekayasa Sanitasi dan Kesehatan Publik

Rekayasa sanitasi berkaitan dengan penyediaan sistem sanitasi yang aman dan efisien, termasuk pengelolaan air limbah dan fasilitas sanitasi yang meminimalkan risiko kesehatan publik. Tanggung jawab ini juga melibatkan mengedukasi masyarakat tentang kebersihan dan sanitasi yang baik (Andersson dkk., 2016).

Contoh: Dalam sebuah kota berkembang, insinyur lingkungan merancang dan membangun sistem pengolahan air limbah yang tidak hanya mengolah air limbah secara efisien tetapi juga mendaur ulang air untuk irigasi. Mereka juga mengadakan workshop tentang sanitasi untuk penduduk lokal, meningkatkan kesadaran dan memastikan penggunaan fasilitas tersebut secara efektif.

9.3.4 Mempertimbangkan Aspek Sosial dalam Perencanaan Proyek

Mempertimbangkan aspek sosial dalam perencanaan proyek melibatkan analisis dan integrasi dampak sosial dan budaya dari proyek-proyek tersebut pada masyarakat lokal. Hal ini penting untuk memastikan bahwa proyek tersebut mendapat dukungan masyarakat dan tidak merugikan mereka (Smyth & Vanclay, 2017).

Contoh: Sebuah proyek pembangunan jalan baru di daerah pedesaan melibatkan konsultasi intensif dengan komunitas lokal untuk memahami rute mana yang paling sedikit mengganggu aktivitas dan situs kultural mereka. Hasilnya, proyek tersebut tidak hanya menghindari area yang penting secara kultural tetapi juga memberikan peningkatan infrastruktur yang membantu masyarakat setempat dalam akses ke pasar dan fasilitas kesehatan.

9.4. Interaksi dengan Masyarakat dan Stakeholder

9.4.1 Komunikasi Efektif Antara Insinyur dan Masyarakat

Komunikasi efektif antara insinyur dan masyarakat adalah kunci untuk membangun kepercayaan dan mendapatkan dukungan publik dalam proyek rekayasa lingkungan. Insinyur harus mampu menyampaikan informasi teknis secara jelas dan transparan kepada masyarakat, mengubah jargon teknis menjadi bahasa yang mudah dipahami. Mereka juga perlu mendengarkan dan memahami kekhawatiran dan harapan masyarakat untuk memastikan bahwa proyek tersebut memenuhi kebutuhan lokal (Druschke & Hychka, 2015).

Contoh: Dalam proyek sanasi dan pengelolaan air limbah di daerah perkotaan, insinyur memegang pertemuan komunitas untuk menjelaskan manfaat lingkungan dan kesehatan dari sistem yang ditingkatkan. Mereka menggunakan visual dan demonstrasi untuk menjelaskan bagaimana sistem akan bekerja, bagaimana hal itu akan mempengaruhi kualitas air lokal, dan apa manfaat kesehatan jangka panjangnya. Mereka juga menyediakan forum untuk pertanyaan dan jawaban, memastikan bahwa kekhawatiran masyarakat diakui dan ditanggapi.

9.4.2 Keterlibatan Stakeholder dalam Proyek Lingkungan

Keterlibatan stakeholder dalam proyek lingkungan melibatkan semua pihak yang berkepentingan atau terpengaruh oleh proyek dari tahap perencanaan hingga pelaksanaan dan pemeliharaan. Proses ini membantu memastikan bahwa proyek mencerminkan kebutuhan dan keinginan dari berbagai kelompok, meningkatkan akseptabilitas sosial dan keberlanjutan proyek tersebut (Bahadorestani dkk., 2020).

Contoh: Dalam proyek rehabilitasi lahan basah, insinyur lingkungan memulai dengan serangkaian lokakarya untuk mengidentifikasi stakeholder yang berkepentingan, termasuk kelompok lingkungan, pemerintah daerah, dan komunitas lokal. Mereka mengadakan sesi brainstorming untuk mengumpulkan masukan dari semua pihak, membahas potensi dampak lingkungan dan sosial, dan menyusun rencana yang mempertimbangkan kebutuhan ekologis serta kegiatan ekonomi lokal seperti pariwisata dan perikanan.

9.4.3 Manajemen Konflik dan Negosiasi Etis

Manajemen konflik dan negosiasi etis dalam konteks rekayasa lingkungan memerlukan pendekatan yang adil dan transparan, di mana semua pihak diperlakukan dengan hormat dan kepentingannya dipertimbangkan. Insinyur harus bertindak sebagai mediator yang netral dan berusaha mencari solusi yang memberi manfaat sebesar-besarnya kepada semua pihak yang terlibat (Shamir, 2016).

Contoh: Saat mengembangkan fasilitas energi terbarukan di daerah rural, terjadi ketegangan antara pengembang dan masyarakat setempat yang khawatir tentang dampak visual dan suara. Insinyur mengorganisir serangkaian pertemuan untuk membahas kekhawatiran ini, membawa eksper independen untuk menjelaskan dampak sebenarnya, dan menegosiasikan paket kompensasi untuk masyarakat setempat yang termasuk peningkatan infrastruktur dan beasiswa pendidikan.

9.4.4 Mempromosikan Keadilan Lingkungan

Mempromosikan keadilan lingkungan melibatkan usaha untuk memastikan bahwa semua individu dan komunitas memiliki akses yang setara ke lingkungan yang sehat dan bebas dari pencemaran (Haughton, 2021). Insinyur memainkan peran kritis dalam mengidentifikasi dan mengatasi ketidakadilan lingkungan melalui desain dan implementasi proyek mereka.

Contoh: Sebuah proyek peningkatan sistem drainase di kota besar dirancang untuk mengatasi banjir yang sering terjadi di daerah berpenghasilan rendah. Insinyur memfokuskan sumber daya pada daerah ini, tidak hanya untuk mengatasi masalah banjir tetapi juga untuk memperbaiki jalan-jalan dan fasilitas umum yang terkait. Mereka bekerja dengan aktivis lokal dan LSM untuk memastikan bahwa proyek tersebut sesuai dengan kebutuhan khusus komunitas tersebut dan melaksanakan program pendidikan tentang manajemen banjir dan keberlanjutan lingkungan.

9.5. Masa Depan Etika dalam Rekayasa Lingkungan

9.5.1 Tantangan dan Peluang dalam Praktik Berkelanjutan

Dalam konteks rekayasa lingkungan, praktik berkelanjutan melibatkan pengembangan dan implementasi solusi yang tidak hanya efisien dan efektif tetapi juga mampu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan meningkatkan kualitas hidup. Tantangan dan peluang dalam praktik ini sering kali terjalin, dimana setiap tantangan juga membawa potensi untuk inovasi dan perbaikan (Duran dkk., 2015).

Tantangan dalam Praktik Berkelanjutan:

1. **Pengelolaan Sumber Daya Terbatas:** Salah satu tantangan utama adalah pengelolaan sumber daya yang terbatas secara efisien. Dengan populasi global yang terus meningkat dan sumber daya alami yang menyusut, insinyur lingkungan harus menemukan cara untuk melakukan lebih banyak dengan lebih sedikit (Jennings & Stadler, 2015).

   Contoh: Dalam pengelolaan air, teknologi seperti desalinasi dan pengolahan air limbah menjadi semakin penting. Misalnya, Singapura telah mengembangkan NEWater, sebuah sistem pengolahan air limbah yang canggih yang menyediakan hampir 40% dari kebutuhan air negara tersebut dengan menyaring air limbah menjadi air yang aman dan minum.

2. **Perubahan Iklim dan Ketahanan:** Perubahan iklim menimbulkan tantangan besar bagi rekayasa lingkungan, terutama dalam merancang infrastruktur yang mampu bertahan terhadap perubahan kondisi iklim yang ekstrem dan tak terduga (Salimi & Al-Ghamdi, 2020).

   Contoh: Desain bangunan tahan banjir di daerah rawan banjir. Di Belanda, insinyur telah merancang 'Rumah Apung' yang dapat naik dengan naiknya permukaan air, sehingga mengurangi risiko kerusakan akibat banjir.

Peluang dalam Praktik Berkelanjutan:

1. **Energi Terbarukan dan Teknologi Bersih:** Meningkatnya fokus pada pengurangan emisi karbon memberi insinyur lingkungan peluang untuk mengembangkan dan menerapkan teknologi energi terbarukan yang inovatif.

   Contoh: Pengembangan turbin angin lepas pantai yang mampu menghasilkan listrik lebih efisien dan dengan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional.

2. **Smart Technologies:** Integrasi IoT (Internet of Things) dan kecerdasan buatan dalam manajemen lingkungan membuka peluang baru untuk monitoring dan operasi yang lebih efisien dari sistem lingkungan hidup (Nižetić dkk., 2020)

   Contoh: Kota pintar menggunakan sensor dan AI untuk mengoptimalkan segalanya mulai dari lalu lintas hingga pengelolaan limbah, mengurangi emisi, dan meningkatkan kualitas udara.

3. **Desain Sirkular dan Ekonomi:** Meningkatnya kesadaran tentang batasan ekonomi linier mendorong insinyur untuk mengeksplorasi desain sirkular, di mana bahan dapat dipulihkan dan digunakan kembali, bukan dibuang.

   Contoh: Penggunaan limbah plastik untuk membuat bahan baku dalam konstruksi jalan, mengurangi limbah dan memperpanjang umur sumber daya.

Menghadapi tantangan ini dan memanfaatkan peluang tersebut membutuhkan pemikiran kreatif, inovasi teknologi, dan komitmen kuat terhadap etika dan keberlanjutan. Melalui pendekatan ini, masa depan etika dalam rekayasa lingkungan terlihat tidak hanya sebagai bidang yang berkelanjutan dari sudut pandang ekologis tetapi juga sebagai pemacu pertumbuhan ekonomi dan sosial yang inklusif.

9.5.2 Inovasi Teknologi dan Dampak Etisnya

Dalam rekayasa lingkungan, inovasi teknologi sering kali menawarkan solusi yang sangat efektif untuk masalah yang kompleks dan mendesak, namun setiap kemajuan teknologi juga membawa potensi dampak etis yang perlu dipertimbangkan (Bernstein, 2015). Etika dalam inovasi teknologi berkaitan dengan pertimbangan apakah teknologi itu meningkatkan atau mengurangi keberlanjutan, bagaimana distribusi manfaat dan beban dari teknologi, dan bagaimana teknologi tersebut mempengaruhi hak dan privasi individu.

Dampak Etis dari Inovasi Teknologi:

1. **Privasi dan Keamanan Data:** Dengan meningkatnya penggunaan sensor dan data besar dalam pengelolaan sumber daya alam dan pemantauan lingkungan, masalah privasi dan keamanan data menjadi semakin penting. Insinyur harus memastikan bahwa data dikumpulkan, disimpan, dan digunakan dengan cara yang menghormati privasi individu dan komunitas.

   Contoh: Dalam proyek smart city, sensor yang dipasang untuk memantau konsumsi air bisa juga mengumpulkan data pribadi tentang kebiasaan penggunaan air individu. Tanpa keamanan yang tepat, data ini bisa disalahgunakan atau dicuri, merugikan pengguna. Oleh karena itu, sangat penting untuk memasukkan enkripsi kuat dan kebijakan privasi yang transparan dalam desain sistem.

2. **Pengurangan Tenaga Kerja:** Automasi dan kecerdasan buatan dapat mengurangi kebutuhan akan tenaga kerja manusia dalam beberapa aspek rekayasa lingkungan, seperti pengelolaan limbah atau pemeliharaan infrastruktur. Sementara ini meningkatkan efisiensi, juga menimbulkan pertanyaan etis tentang dampak sosial dari kehilangan pekerjaan.

   Contoh: Penggunaan drone dan AI untuk pemantauan kebocoran dan polusi di pipa air dan fasilitas dapat mengurangi jumlah pekerja yang dibutuhkan untuk inspeksi manual. Solusi etis

mungkin melibatkan pelatihan ulang karyawan yang terdampak untuk pekerjaan teknologi tinggi lainnya dalam perusahaan.

3. **Dampak Lingkungan dari Teknologi Baru:** Teknologi baru dapat memiliki dampak lingkungan yang tidak terduga, yang mungkin tidak langsung jelas. Evaluasi dampak lingkungan yang cermat dan transparan perlu dilakukan sebelum penerapan teknologi.

   Contoh: Penggunaan panel surya skala besar untuk menghasilkan energi terbarukan adalah langkah positif untuk keberlanjutan, tetapi pembangunan fasilitas tersebut dapat mengganggu habitat lokal dan mengurangi biodiversitas. Insinyur harus mendesain proyek dengan mempertimbangkan penuh lokasi dan ekologi, seringkali menggunakan sistem agrovoltaik yang menggabungkan produksi energi dengan pertanian untuk meminimalisir dampak.

4. **Distribusi Manfaat:** Manfaat dari inovasi teknologi harus didistribusikan secara adil di antara berbagai kelompok masyarakat. Tidak semua komunitas memiliki akses yang sama terhadap teknologi baru, yang bisa memperlebar kesenjangan sosial.

   Contoh: Pemasangan infrastruktur internet broadband di daerah perkotaan biasanya lebih cepat dan ekstensif dibandingkan di daerah pedesaan, memberikan keuntungan ekonomi dan pendidikan pada penduduk kota. Untuk menangani ketidakadilan ini, insinyur bisa bekerja dengan pemerintah untuk memastikan bahwa proyek infrastruktur juga mencakup daerah yang kurang dilayani.

Memasukkan pertimbangan etis ke dalam inovasi teknologi tidak hanya membantu dalam memastikan bahwa teknologi digunakan untuk kebaikan yang lebih besar tetapi juga dalam menjaga kepercayaan publik dan dukungan untuk inovasi di masa depan. Seiring teknologi berkembang, begitu pula pertimbangan etis yang harus dilakukan para insinyur untuk memastikan bahwa mereka terus bertindak dengan cara yang bertanggung jawab dan berkelanjutan.

9.5.3 Pendidikan Etika untuk Insinyur Lingkungan

Pendidikan etika merupakan komponen penting dalam pelatihan insinyur lingkungan, yang menyiapkan mereka untuk menghadapi dilema etis yang mungkin dihadapi dalam karier profesional mereka. Fokus utama pendidikan etika adalah mengintegrasikan prinsip etis ke dalam pemikiran kritis dan proses pengambilan keputusan, sehingga insinyur bisa mengambil tindakan yang tidak hanya teknis kompeten tetapi juga moral dan sosial bertanggung jawab (Luegenbiehl, 2017).

Pentingnya Pendidikan Etika:

1. **Meningkatkan Kesadaran:** Memperkenalkan insinyur muda pada berbagai skenario etis yang mungkin mereka hadapi dalam praktek profesional, meningkatkan kesadaran mereka tentang potensi dampak keputusan mereka terhadap masyarakat dan lingkungan.
2. **Pengembangan Keterampilan Pengambilan Keputusan:** Melengkapi insinyur dengan alat untuk menilai situasi dari berbagai sudut pandang etis, mempromosikan kemampuan untuk membuat keputusan yang bijaksana dan adil.
3. **Mempromosikan Tanggung Jawab Profesional:** Mendorong pemahaman bahwa insinyur memiliki kewajiban untuk melindungi kesehatan, keselamatan, dan kesejahteraan publik melalui pekerjaan mereka.

Contoh Implementasi Pendidikan Etika:

1. **Kurikulum yang Terintegrasi:** Universitas teknik memperkenalkan kursus wajib tentang etika dan keberlanjutan dalam program insinyur lingkungan mereka. Kursus ini mencakup studi kasus yang nyata, di mana mahasiswa harus mengevaluasi dan membahas keputusan dalam konteks etis. Misalnya, sebuah studi kasus dapat melibatkan desain sistem drainase di daerah yang sering mengalami banjir; mahasiswa ditugaskan untuk mempertimbangkan opsi yang tidak hanya mengurangi risiko banjir tetapi juga meminimalisir gangguan terhadap habitat lokal dan komunitas.

2. **Workshop dan Simulasi:** Program pelatihan profesional untuk insinyur yang sudah bekerja menyediakan workshop yang memungkinkan peserta untuk berpartisipasi dalam simulasi keputusan rekayasa. Simulasi ini sering kali berbasis tim dan mendesain untuk mereplikasi situasi dunia nyata di mana harus dibuat keputusan yang mempengaruhi berbagai pemangku kepentingan. Contohnya, simulasi yang menuntut insinyur untuk merancang pembangunan infrastruktur di daerah terpencil tanpa merusak lingkungan setempat dan menghormati hak komunitas adat.
3. **Penelitian dan Publikasi:** Sebagai bagian dari tesis mereka, mahasiswa PhD di insinyur lingkungan dapat melakukan penelitian tentang penerapan prinsip etika dalam proyek rekayasa besar. Penelitian ini kemudian dipresentasikan di konferensi internasional dan dipublikasikan dalam jurnal ilmiah, berkontribusi pada diskusi global tentang praktek etis dalam rekayasa lingkungan.

Pendidikan etika untuk insinyur lingkungan memastikan bahwa mereka tidak hanya siap secara teknis tetapi juga secara moral untuk menghadapi tantangan yang akan datang dalam karier mereka. Dengan pendidikan yang kuat dalam etika, insinyur dapat lebih efektif dalam merancang dan melaksanakan solusi yang berkelanjutan dan adil, mengarah pada hasil yang lebih baik bagi masyarakat dan lingkungan

9.5.4 Membangun Kode Etik Global untuk Rekayasa Lingkungan

Pembangunan kode etik global untuk rekayasa lingkungan adalah sebuah upaya untuk menetapkan standar universal yang mengatur praktek profesional insinyur lingkungan di seluruh dunia. Kode etik ini bertujuan untuk memastikan bahwa semua insinyur beroperasi dengan tingkat tanggung jawab yang tinggi terhadap lingkungan dan masyarakat, terlepas dari perbedaan budaya, ekonomi, dan regulasi lokal. Kode etik ini penting karena menghadapi tantangan lingkungan global membutuhkan konsistensi dalam standar etis dan profesional (Ralph, 2019).

Kegunaan Kode Etik Global:

1. **Konsistensi Praktek:** Membantu menjamin bahwa insinyur di seluruh dunia mengikuti prinsip-prinsip etika yang sama dalam pekerjaan mereka, yang sangat penting untuk proyek lintas negara dan kolaborasi internasional.
2. **Peningkatan Kepercayaan Publik:** Dengan mengadopsi kode etik yang universal, profesi rekayasa lingkungan meningkatkan kepercayaan publik terhadap integritas dan komitmen mereka terhadap keberlanjutan dan keadilan.
3. **Panduan dalam Menghadapi Dilema Etis:** Menyediakan kerangka kerja bagi insinyur untuk membuat keputusan etis ketika dihadapkan pada dilema yang kompleks, terutama dalam situasi yang melibatkan konflik antara kebutuhan ekonomi dan perlindungan lingkungan.

Komponen Utama dari Kode Etik Global:

1. **Perlindungan Lingkungan:** Kode harus menekankan tanggung jawab insinyur untuk melindungi lingkungan sebagai prioritas utama dalam semua aspek rekayasa mereka.
2. **Keadilan dan Kesetaraan:** Menyertakan kebutuhan untuk memastikan bahwa manfaat dan beban dari proyek rekayasa didistribusikan secara adil di antara semua kelompok masyarakat, termasuk komunitas yang rentan dan terpinggirkan.
3. **Kejujuran dan Transparansi:** Mendikte bahwa insinyur harus selalu jujur dalam komunikasi mereka dan terbuka tentang potensi dampak dan risiko proyek.
4. **Tanggung Jawab Profesional:** Menggarisbawahi pentingnya melaksanakan tugas dengan mempertimbangkan konsekuensi jangka panjang dari keputusan dan desain teknis.

Contoh Aplikasi Kode Etik Global:

1. **Pembangunan Bendungan Internasional:** Sebuah proyek pembangunan bendungan yang melibatkan beberapa negara di Amerika Selatan menetapkan kode etik global sebagai panduan.

Kode tersebut memastikan bahwa semua keputusan desain mempertimbangkan dampak lingkungan dan sosial secara menyeluruh. Insinyur berkolaborasi dengan komunitas lokal dan pakar lingkungan untuk mengembangkan solusi yang mengurangi penggusuran penduduk dan meminimalisir kerusakan habitat alami.

2. **Konsultasi Lintas Negara:** Dalam proyek rehabilitasi lahan di Afrika, insinyur dari berbagai negara menggunakan kode etik untuk menavigasi perbedaan norma lokal dan internasional. Mereka bekerja bersama pemerintah setempat dan LSM untuk memastikan bahwa proyek tersebut tidak hanya memenuhi standar teknis tetapi juga mendukung pengembangan ekonomi dan sosial masyarakat setempat.

Pembangunan dan adopsi kode etik global tidak hanya memperkuat praktek etika dalam rekayasa lingkungan tetapi juga mempromosikan sebuah pendekatan yang lebih kohesif dan seragam dalam menghadapi tantangan lingkungan global. Kode etik ini mendukung upaya-upaya untuk menciptakan solusi yang berkelanjutan dan adil, memperkuat peran insinyur lingkungan sebagai pelindung sumber daya alam dan kepentingan masyarakat.

Bab 10

STUDI KASUS MANAJEMEN REKAYASA LINGKUNGAN

10.1 Analisis Studi Kasus Sukses

Sebagian besar manajemen rekayasa lingkungan melibatkan pengelolaan kasus yang berkaitan dengan air, tanah, udara, energi (minyak dan gas), tanaman, dan biota laut. Beberapa kerusakan lingkungan umumnya diakibatkan oleh adanya limbah, bencana alam, dan eksploitasi sumber daya alam. Secara umum eksploitasi sumber daya alam akan menimbulkan dampak lingkungan yang berpengaruh terhadap hidup manusia, antara lain seperti penebangan pohon menyebabkan lahan gundul yang berpotensi menimbulkan banjir dan longsor, pemakaian bahan bakar yang bisa menimbulkan polusi, penggunaan deterjen yang bisa menimbulkan pencemaran tanah, penambangan yang bisa merusak lingkungan dan lain sebagainya.

10.1.1 Studi Kasus Air Asam Tambang

Industri pertambangan menimbulkan banyak dampak baik lingkungan maupun sosial (Siregar et al., 2021). Limpasan air tambang yang bersifat asam yang mengalir akan mengganggu biota air (Suryadi & Kusuma, 2019). Air asam tambang (AAT) merupakan air tanah atau hujan pada lokasi penambangan yang bersifat asam karena bercampur dengan batuan yang bersifat sulfide (Said, 2014). Air asam tambang berbahaya karena mengandung zat besi dan mangan sehingga dapat menyebabkan kerusakan lingkungan berupa pencemaran air tanah, sungai bahkan air laut sehingga membutuhkan penanganan dan pengelolaan yang baik.

Studi kasus manajemen rekayasa lingkungan dapat dilihat pada pengelolaan limbah berupa air asam tambang pada PT. Rimau Energy Mining, salah satu perusahaan pertambangan di bidang batubara yang

ada di Kabupaten Barito Tumur, Propinsi Kalimantan Tengah. Pengelolaan air asam tambang di perusahaan ini terbagi atas beberapa langkah yaitu:

1. Mengetahui kuantitas air berdasarkan perhitungan curah hujan.
2. Melakukan evaluasi terhadap *settling pond* (kolam pengendapan).
3. Melakukan pengujian terhadap variable tawas (penjernihan air) dan variable kapur (peningkatkan pH air).
4. Memantau sifat fisik air yaitu warna, keruh dan pH air.

Penanganan limbah air asam tambang yang ada di PT Rimau Energy Mining di awali dengan pembuatan kolam pengendapan untuk menampung air yang akan dipompa dari *sump* pit (area lubang pembuangan). Sump pit pada Pit 1 dapat dilihat pada Gambar 10.1.

Gambar 10.1 Air pada *Sump* Pit 1 PT Rimau Energy Mining

(Sumber : Anshariah et al., 2015)

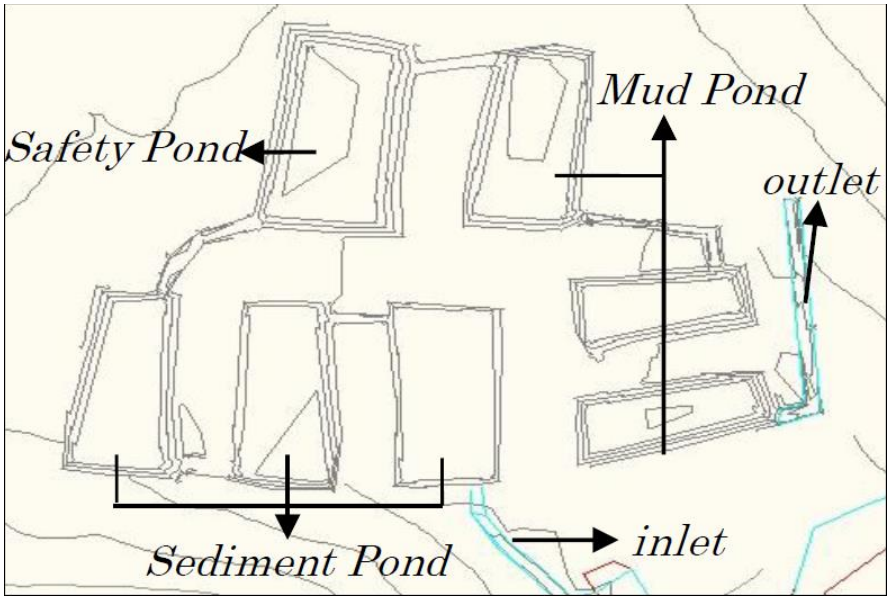
Gambar 10.1 memperlihatkan kondisi air pada *Sump* Pit 1 dengan warna air yang sangat keruh dan berwarna coklat. Pengukuran pH pada air diperoleh pH 6,6 walaupun demikian kondisi fisik air sangat buruk sehingga diperlukan tindakan lebih lanjut. Air yang ada di sump pit 1 merupakan air limpasan hujan yang telah bercampur dengan zat pencemar sehingga sangat penting untuk menghitung kuantitas air hujan. Berdasarkan perhitungan curah hujan dengan metode gumbel diperoleh frekuensi curah hujan sebesar 107,738 mm (periode ulang dua (2) tahun). Setelah itu dihitung jumlah debit limpasan air yang masuk ke dalam kolam pit (*sump pit*) berdasarkan parameter yang telah diketahui atau dihitung sebelumnya yaitu; waktu konsentrasi (22,51 menit), intensitas curah hujan (71,81 mm/jam), koefisien aliran (0,7), dan luasan wilayah tangkapan hujan (0,576 km^2).

Gambar 10.2 Pompa pada Pit 1 PT Rimau Energy Mining

(Sumber : Anshariah et al., 2015)

Pengelolaan limbah air asam tambang dilakukan dengan sistem *dewatering* yaitu mengeluarkan air dari *sump* pit dan dibawa ke kolam pengendapan untuk dilakukan analisis dan pengolahan. Untuk mengalirkan air pada *sump* pit diperlukan alat berupa pompa air (Gambar 13.2). Kemampuan maksimum pompa atau kapasitas maksimal dalam memompa air yaitu 639 m^3/jam dengan waktu pompa selama kurang lebih 17 jam. Jenis pipa yaitu tipe Sunflex WSD 150 dengan panjang pipa 406,83 m dan diameter pipa 6 inch. Air yang dipompa dari *sump* pit menuju kolam pengendapan membutuhkan saluran agar bisa mengalir dengan lancar.

Air asam tambang yang telah masuk ke dalam kolam pengendapan kemudian dilakukan pengolahan untuk mengendapkan partikel-partikel dan menstabilkan pH. Pengolahan pada kolam pengendapan dilakukan melalui pembagian 7 kompartemen (Gambar 13.3), dengan tiga kolam secara umum yaitu *sediment pond* (kolam sedimen), *mud pond* (kolam lumpur) dan *safety pond* (kolam aman).



Gambar 10.3 Kolam pengendapan pada Pit 1 PT Rimau Energy Mining

(Sumber: Anshariah et al., 2015)

Setiap kolam kompartemen mempunyai dimensi dan fungsi yang berbeda (**Tabel 10.1**). Kolam sedimen merupakan kolam pertama untuk menampung dan mengendapkan sedimen dengan ukuran butir yang lebih besar. Air yang keluar dari kolam sedimen kemudian masuk ke dalam kolam lumpur yaitu kolam untuk mengendapkan lumpur atau sedimen halus dengan ukuran butir yang lebih kecil. Setelah dari kolam lumpur air kemudian mengalir ke dalam kolam aman. Setiap kolam mempunyai *detention time* yaitu waktu yang dibutuhkan oleh partikel untuk mengendap di dalam kolam (**Tabel 10.2**).

Tabel 10.1 Dimensi Kolam Pengendapan

Kolam Kompartemen	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Luas (m^2)	Volume (m^3)	Proses
Sediment Pond 1	36,25	25	2	906,25	1.812,5	Pengendapan
Sediment Pond 2	36,25	20	3	725	2.175	Pengendapan
Sediment Pond 3	36,25	20	3	725	2.175	Pengendapan
Safety Pond	40	25	3	1000	3.000	Stabilisasi
Mud Pond 1	36	20	3	720	2.160	Pengendapan
Mud Pond 1	30,5	15	3	457,5	1.372,5	Pengendapan
Mud Pond 1	35	15	3	525	1.575	Pengendapan

(Sumber : Anshariah et al., 2015)

Tabel 10.2 *Detention Time* Kolam Pengendapan

Kolam Kompartemen	Volume (m^3)	Debit (m^3/menit)	Detention Time (menit)
Sediment Pond 1	1.812,5	24,984	72,546
Sediment Pond 2	2.175	24,984	87,056
Sediment Pond 3	2.175	24,984	87,056
Safety Pond	3.000	24,984	120,077
Mud Pond 1	2.160	24,984	86,455
Mud Pond 1	1.372,5	24,984	54,935
Mud Pond 1	1.575	24,984	63,040
Total	14.270		571,166

(Sumber : Anshariah et al., 2015)

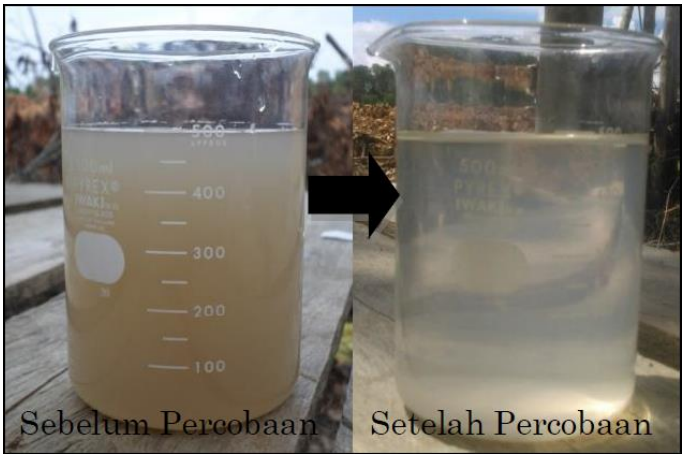
Air yang telah mengendap di kolam aman, selanjutnya dilakukan pengolahan air dengan cara dicampur dengan bahan koagulan yang berguna untuk penjernihan air dan menetralkan pH air. Untuk mencampur diperlukan wadah untuk mengaduk dengan cara membuat kolam pengadukan berupa kolam ukuran kecil dengan dimensi tinggi 0,5 meter, lebar 1 meter dan panjang 1 meter. Kolam pengadukan dibuat dengan dimensi menyerupai air terjun kecil (miniatur air terjun) agar air mengalir dan teraduk secara alami (**Gambar 10.4**).

Gambar 10.4 Kolam pengadukan pada PT Rimau Energy Mining

(Sumber : Anshariah et al., 2015)

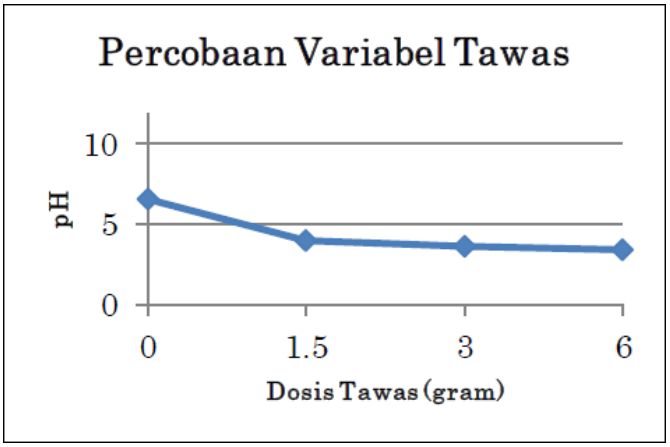
Dalam proses koagulasi, bahan koagulan yang digunakan berupa tawas dan kapur. Pengujian menggunakan tawas dengan beberapa variable dosis seperti berikut; tawas sebanyak 1,5 gram, sampel air 500 ml, waktu pengendapan 1, 5 jam diperoleh hasil air yang awalnya keruh berubah menjadi jernih. Perubahan warna atau reaksi sifat air (Gambar 10.5) menunjukkan reaksi yang positif tetapi penurunan pH sesuatu yang harus dipikirkan jalan keluarnya (**Gambar 10.6**). Standar air yang baik memiliki pH netral antara pH 6,5 – 8,5 (Revansyah et al., 2022), sehingga perlu ditambahkan koagulan lain berupa kapur. Penggunaan kapur dilakukan dengan beberapa variabel. Hasil percobaan memperlihatkan bahwa pH air dapat dinetralkan dari pH 4 berubah menjadi pH 7.9

dengan jumlah kapur yaitu 1 gram (Gambar 10.7) dan sampel air yang diendapkan selama 0,5 jam atau 30 menit berubah menjadi lebih jernih. Penggunaan koagulan umumnya bersifat lokal tergantung lokasi penambangan. Selain menggunakan koagulan kimia bisa juga ditambah dengan menggunakan tanaman daerah setempat yaitu eceng gondok di Kalimantan Timur berdasarkan metode lahan basah buatan (Maulida & Purwanti, 2023).



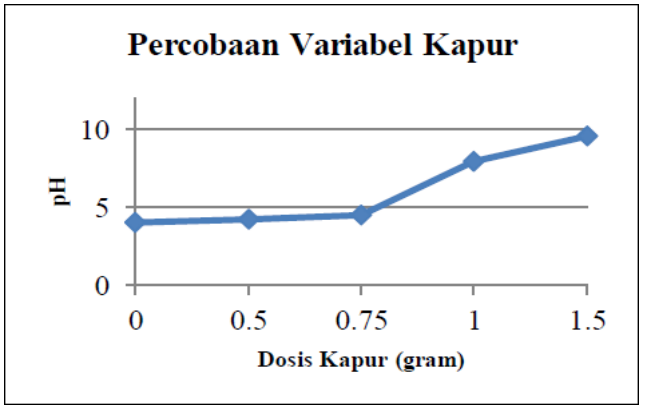
Gambar 10.5 Perubahan warna air

(Sumber : Anshariah et al., 2015)



Gambar 10.6 Grafik percobaan menggunakan variable tawas

(Sumber : Anshariah et al., 2015)



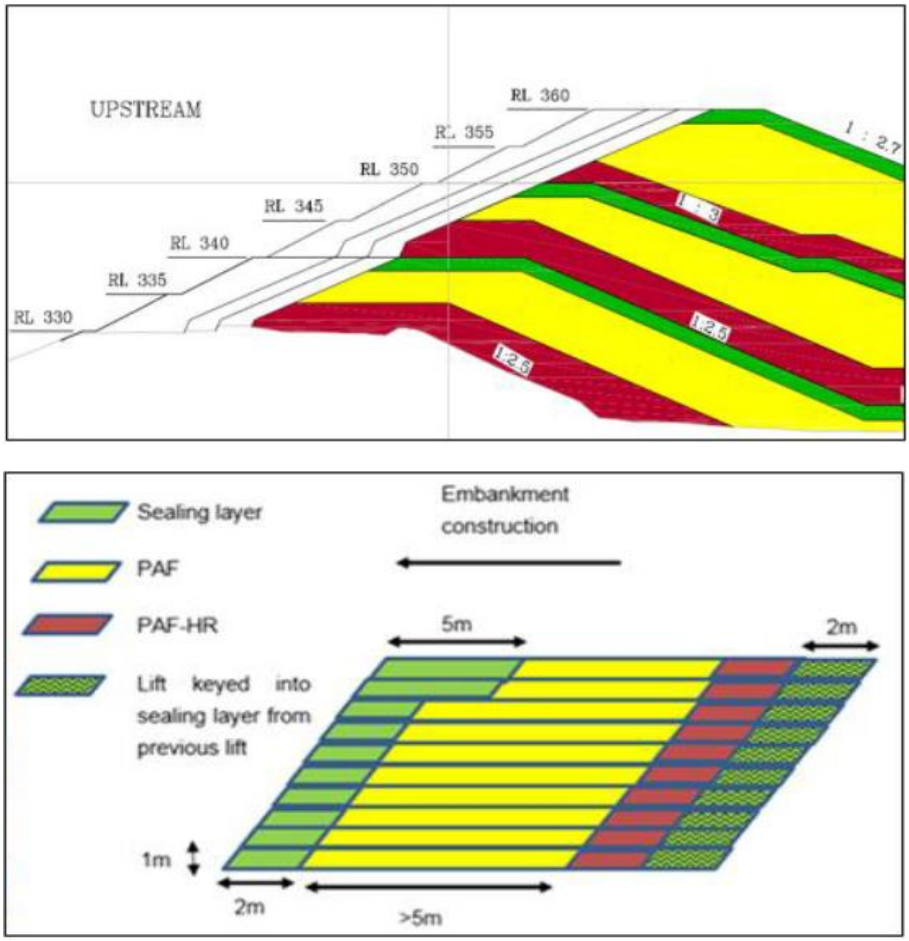
Gambar 10.7 Grafik percobaan menggunakan variable kapur

(Sumber : Anshariah et al., 2015)

Grafik dosis kapur dan pH pada **Gambar 10.7** menunjukkan bahwa penggunaan kapur pada dosis 1 gram mampu merubah sifat air dari pH 4 menjadi ph 7.9. Hal ini menjelaskan bahwa metode dewatering dengan campuran tawas dan kapur mampu membuat air asam yang awalnya keruh bisa berubah menjadi jernih dan pH nya tetap normal. Metode pengelolaan air asam tambang tidak hanya menggunakan metode dewatering seperti pada PT Rimau Energy Mining tetapi juga bisa menggunakan metode lain seperti yang diterapkan pada PT Agincourt Resource di tambang emas.

Pengelolaan air asam tambang pada PT Agincourt Resource dilakukan menggunakan metode enkapsulasi (*sealing layer*), salah satu metode yang mampu menghambat atau bahkan mencegah terjadinya pengembangan air asam tambang (Henim & Pearce, 2019). Metode enkapsulasi merupakan metode yang bertujuan untuk membungkus material sulfida beresiko tinggi yang sedang di tambang dengan lapisan penyegel (*sealing layer*). Material sulfide tadi ditempatkan di suatu tempat agar tidak bercampur dengan benda lain terutama cairan sehingga perlu dilakukan monitoring atau pemantauan. Monitoring ini dilakukan menggunakan instrumen WRSF (*Waste Rock Storage Facility*) untuk mengukur oksigen dan kualitas air menunjukkan bahwa enkapsulasi

material *waste* pada embakment atau tanggul TSF berhasil mencegah pembentukan air asam tambang. Penempatan material *waste* menggunakan model *piggyback* struktur internal (**Gambar 10.8**).



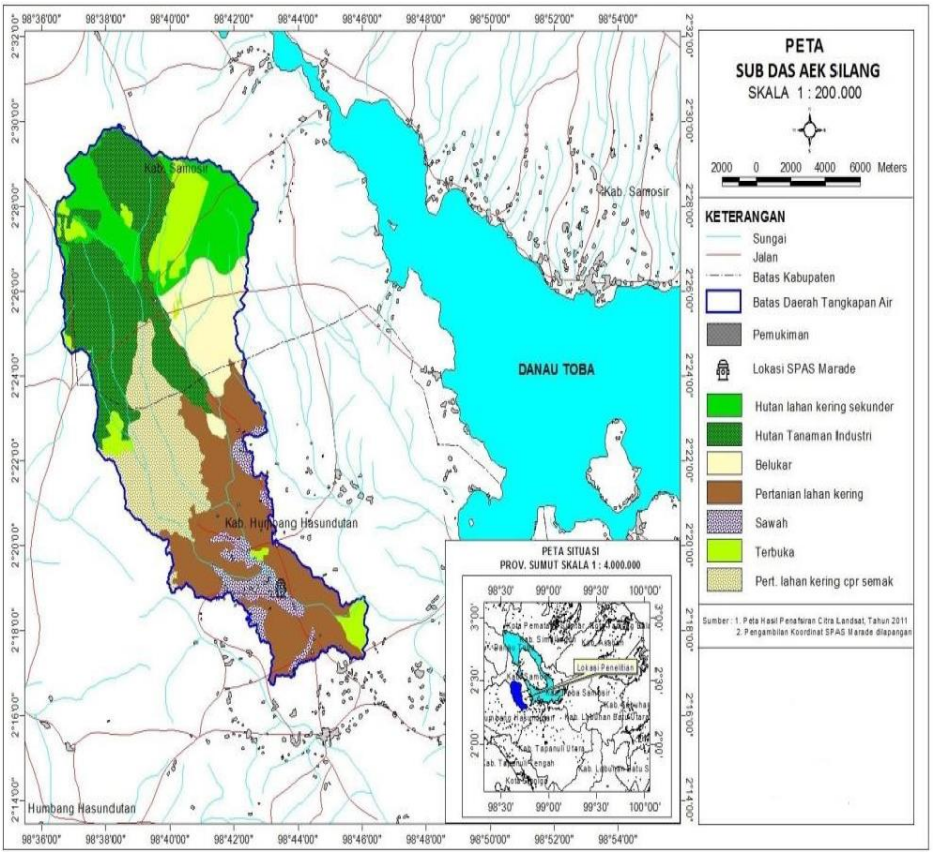
Gambar 10.8 Struktur internal dari model enkapsulasi

(Sumber : Henim & Pearce, 2019)

Penggunaan enkapsulasi juga bisa dikombinasi dengan penggunaan bahan kimia seperti yang digunakan pada PT. Kayan Putra Utama Coal (Tom et al., 2020). Mitigasi dan pengelolaan air asam tambang dilakukan melalui hutan rawa buatan di lahan pasca tambang Pada PT Jorong Barutama Greston yang terletak di Kalimantan Selatan (Yusmur et al., 2019).

10.1.2 Studi Kasus Konservasi Sumber Air

Konservasi sumber air dilakukan untuk menjaga agar ketersediaan air dan penggunaannya seimbang sehingga tidak mengganggu kehidupan manusia. Konservasi air melalui pengelolaan yang efektif dan penggunaan yang efisien sangat dibutuhkan. Pengelolaan sumber air berdasarkan keberadaannya sebagai sumber daya alam merupakan bagian dari program konservasi sumber air untuk memelihara, menjaga dan memanfaatkan sumber air yang ada secara efektif dan efisien untuk kesejahteraan masyarakat (Sallata, 2015). Model konservasi sumberdaya air dapat dilakukan dengan cara seperti yang ada di Sub DAS Aek Silang, DTA Danau Toba, Propinsi Sumatera Utara (**Gambar 10.9**).



Gambar 10.9 Peta Sub DAS Aek Silang

(Sumber : Sihotang et al., 2016)

Kegiatan dalam konservasi sumberdaya air dilakukan melalui tiga hal yaitu (1) perlindungan dan pelestarian sumberdaya air, (2) pengawetan dan pengelolaan kualitas air, dan (3) pengendalian pencemaran air (Sihotang et al., 2016). Penentuan model kegiatan konservasi dilakukan menggunakan metode AHP (*Analytical Hierarchy Process*). Dalam model tersebut ada pihak-pihak yang berfungsi sebagai pelaku dan mempunyai peran masing-masing dalam konservasi sumberdaya air. Pihak dan peran masing-masing kelompok tersebut yaitu sebagai berikut:

1. Instansi Pemerintah, sebagai pembuat kebijakan terkait dengan ketersediaan air.
2. Dunia Usaha, yaitu pihak yang menggunakan air yang sekaligus berpengaruh terhadap keberlanjutan tersedianya air.
3. Perguruan Tinggi, yaitu pihak yang memahami tentang pengetahuan dan teknologi dalam pencarian sumberdaya air dan menjaga ketersediaan air.
4. Masyarakat, yaitu pihak yang memanfaatkan air dan memantau ketersediaan air di masyarakat.

Setiap kelompok yang ada di atas dilakukan wawancara untuk mendapatkan data dan informasi yang akan diolah dalam sistem AHP, sistem yang dikembangkan oleh Thomas L Saaty. Sistem AHP (*Analytical Hierarchy Process*) merupakan metode untuk menyelesaikan masalah dengan cara mengumpulkan pendapat orang kemudian pendapat atau persepsi orang-orang ini diolah dengan sedemikian rupa menggunakan prosedur tertentu agar masalah yang dihadapi bisa terpecahkan dan terselesaikan. Pengumpulan data atau pendapat dilakukan secara terstruktur sesuai dengan pihak-pihak yang terlibat dalam perlindungan sumber air.

Untuk menjaga ketersediaan air maka perlu dilakukan perlindungan dan pelestarian sumberdaya air dari berbagai macam kerusakan, baik kerusakan akibat tindakan manusia ataupun kerusakan akibat alam agar air tetap terjaga. Kemudian dilakukan pengawetan air berupa upaya pemeliharaan keberadaan sumberdaya air agar tersedia secara berkelanjutan. Selanjutnya pengelolaan kualitas dan pengendalian

pencemaran dilakukan untuk mempertahankan dan memulihkan kualitas air yang ada di sumber air.

10.1.3 Studi Kasus Mitigasi Bencana

Manajemen mitigasi bencana alam merupakan suatu hal yang sangat penting agar ketika terjadi bencana maka setiap pihak sudah tahu apa yang harus dilakukan untuk menghindari atau meminimalisir efek negatif dari dari bencana tersebut. Secara geografis dan geologi Indonesia merupakan kawasan rawan bencana, seperti misalnya gempa bumi yang melanda Kota Palu, Sulawesi Tengah (Sukino et al., 2019), banjir, puting beliung dan tanah longsor di Kabupaten Jombang (Nisa, 2014), banjir di Kelurahan Paccerakkang Kota Makassar (Wahyudi et al., 2019) dan lain sebagainya.

Di antara beberapa kasus bencana di atas, salah satu yang menjadi studi kasus dalam manajemen penanggulangan bencana banjir yaitu yang terjadi di Kelurahan Paccerakkang Kota Makassar, Sulawesi Selatan. Kelurahan ini merupakan wilayah yang sering mengalami banjir dan hampir setiap musim hujan deras selalu terjadi banjir. Berdasarkan hasil studi dan observasi maka manajemen penanggulangan banjir di Kelurahan Paccerakkang dilakukan melalui beberapa tahap yaitu perencanaan, pengorganisasian, pengarahan dan pengendalian atau pengawasan. Setiap tahapan ini dilakukan melalui observasi, diskusi dan wawancara untuk mendapatkan informasi terkait banjir di wilayah ini.

Pada tahap perencanaan diketahui bahwa Kelurahan Paccerakkang merupakan lokasi dataran rendah dan berada tidak jauh dari sungai. Kemudian wilayah ini merupakan daerah yang semakin padat dalam pembangunan sehingga mengurangi daerah resapan air. Beberapa tindakan yang dilakukan dalam perencanaan terkait pencegahan yaitu:

1. Membuat dan menempatkan tanda peringatan, tanda bahaya, dan tanda larangan memasuki wilayah rawan bencana.
2. Mengawasi terkait ketaatan dalam peraturan tata ruang, izin mendirikan bangunan (IMB) dan peraturan lain terkait dengan pencegahan bencana.

3. Melatih aparat dan masyarakat terkait dengan pemahaman tentang dasar-dasar kebencanaan.
4. Melakukan penyuluhan kepada masyarakt.
5. Bersama-sama kerja bakti setiap saat sesuai jadwal yang telah di tetapkan.

Pada tahap pengorganisasian, setiap sumberdaya manusia dan sumberdaya fisik diatur agar berjalan dengan tugas dan fungsinya masing-masing. Sumberdaya manusia terdiri dari pemerintah kota, kelurahan, dan masyarakat setempat. Setiap petugas dipilih sesuai dengan kemampuan dan keahliannya. Setiap orang harus bekerja sama dalam hal menanggulangi banjir, segera melakukan evakuasi jika terjadi banjir, dan melakukan rehabilitasi setelah terjadi banjir. Kemudian pada tahap pengarahan dilakukan secara menyeluruh untuk semua sumberdaya manusia. Pemerintah kota dan kelurahan memberikan pengarahan secara rutin kepada pegawai dan masyarakat agar selalu mengingat tentang bahaya banjir di kelurahan tesrsebut.

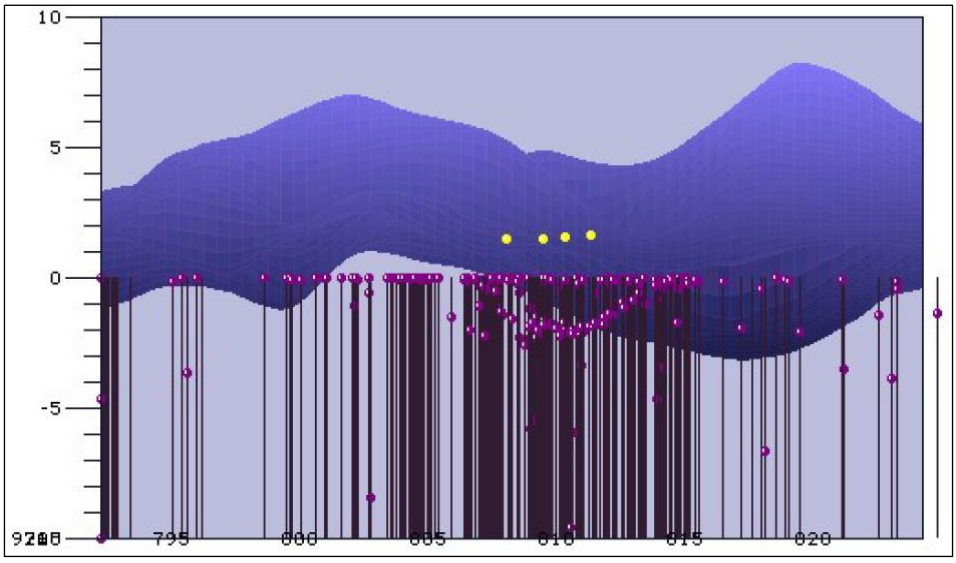
Pada tahap pengawasan dan pengendalian, dilakukan oleh pemerintah kelurahan agar pegawai dan masyarakat menjalankan arahan yang telah diberikan. Para pegawai harus memantau secara rutin saluran air agar tidak ada yang tersumbat agar ketika terjadi hujan air bisa mengalir tanpa meluap ke rumah warga. Pegawai kelurahan dan warga saling bekerja sama dalam upaya pengawasan dan pengendalian untuk meminimalisir bahay banjir dan jika terjadi banjir maka bisa diantisipasi untuk mengurangi korban harta dan jiwa. Secara umum manajemen penanggulangan banjir di Kelurahan Paccerakkang dilakukan dengan cara memperbaiki drainase, menyediakan ruang terbuka hijau, memperbaiki tata ruang lingkungan pemukiman dan tidak membuang sampah sembarangan (Abduh et al., 2023).

10.1.4 Studi Kasus Energi Terbarukan

Energi terbarukan merupakan sumber energi yang sangat berguna untuk mengatasi krisis kekurangan energi dan ketergantungan dari bahan bakar minyak dan gas. Keuntungan menggunakan energi terbarukan yaitu bisa mengurangi kerusakan lingkungan (Fandari et al., 2014). Energi terbarukan menjadi energi alternatif dan mempunyai

berbagai macam bentuk antara lain panas matahari, etanol, angin, panas bumi, *hydropower*, biomassa, gelombang laut dan tidal, hydrogen (Siagian et al., 2023). Salah satu energi terbarukan yang sudah lama digunakan di Indonesia adalah energi panas bumi (*geothermal*). Energi panas bumi merupakan energi yang ramah lingkungan dan menjadi salah satu proyek untuk mencapai target proyek listrik pemerintah (Laksminingpuri & Martinus, 2013).

Panas bumi membutuhkan pengelolaan yang baik agar pemanfaatannya bisa secara berkelanjutan. Salah satu cara mengelola energi panas bumi adalah dengan melakukan pemeliharaan reservoir dengan cara monitoring mikrosesmik. Studi kasus monitoring mikroseismik dilakukan pada lapangan panas bumi Kamojang, Jawa Barat (Hilyah & Utama, 2016). Monitoring ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana fluida injeksi berperan dalam pembentukan *hydrofracturing* dan pengaruh *seismogenic* terhadap reservoir.



Gambar 10.10 Penampang Hiposenter Barat – Timur Area Panas Bumi

(Sumber : Hilyah & Utama, 2016)

Hiposenter di area panas bumi Kamojang sebagian besar berada di bawah zona reservoir dan sebagian lagi berada di zona reservoir (**Gambar 10.10**). Penyebaran gempa dengan hiposenter dangkal berada

tidak jauh dari sumber panas bumi dan berada di sekitar sumur eksploitasi. Hal ini menunjukkan bahwa mikroseismik yang terjadi pada area ini turut mempengaruhi proses yang terjadi dalam reservoir panas bumi seperti transfer panas fluida. Manajemen pengelolaan energi panas bumi melalui monitoring reservoir ini sangat penting untuk menjaga agar sumber energi panas bumi yang ada di Kamojang tetap berfungsi dan berkelanjutan sehingga pasokan listrik untuk masyarakat tidak mengalami hambatan.

10.2 Pelajaran dari Studi Kasus

Pengelolaan lingkungan membutuhkan penanganan yang saling keterkaitan baik dari sisi teknis maupun non teknis. Dari berbagai macam studi kasus manajemen rekayasa lingkungan yang telah disampaikan di atas maka dapat diambil beberapa pelajaran. Pemerintah, dunia usaha, perguruan tinggi dan masyarakat dituntut untuk saling bersinergi dalam menghadapi kasus lingkungan demi mendapatkan lingkungan yang sehat, ramah lingkungan dan meminimalisir bencana.

Pada kasus air asam tambang, hal yang paling penting adalah kemampuan teknis berupa pengetahuan tentang bahaya air asam tambang dan manajemen penanganannya. Pada PT Rimau Energy Mining air asam ditangani dengan cara pembuatan kolam pengendapan kemudian airnya dicampur dengan koagulan berupa tawas dan kapur untuk menjernihkan dan menstabilkan pH air. Penanganan air asam tambang membutuhkan tenaga ahli, metode, biaya dan waktu untuk mendapatkan hasil yang maksimal sehingga dapat meminimalisir dan mengurangi dampak negatif dari penambangan terhadap lingkungan.

Pada kasus konservasi sumber air diperlukan kerja sama antar pihak untuk menjaga agar sumber air tetap lestari dan dapat digunakan secara berkelanjutan. Pihak pemerintah melalui instansi tertentu diperlukan untuk membuat kebijakan terkait dengan sumberdaya air. Dunia usaha dan masyarakat sebagai pengguna air dituntut agar lebih bijak dalam memanfaatkan air sesuai dengan kebutuhan. Pihak perguruan tinggi sebagai lembaga yang mempunyai pemahaman ilmu dan teknologi agar mampu memberi informasi kepada masyarakat terkait ketersediaan dan pencarian sumberdaya air.

Pada kasus mitigasi bencana alam seperti banjir yang terjadi di Kelurahan Paccerakkang Kota Makassar, Sulawesi Selatan diperlukan perencanaan, pengorganisasian, pengarahan dan pengendalian atau pengawasan dalam penanganan bahaya banjir. Kondisi wilayah yang sudah menjadi langganan banjir membutuhkan penanganan khusus, baik untuk mencegah banjir, penanganan saat terjadi banjir dan sesudah banjir. Upaya untuk mencegah banjir membutuhkan usaha yang semaksimal mungkin seperti larangan membuat sampah di sungai atau saluran drainase, selalu membersihkan saluran drainase, panataan ruang dalam mendirikan bangunan, dan lain sebagainya.

Pada kasus energi terbarukan, sumber energi yang menjadi studi kasus adalah energi panas bumi yang ada di Kamojang, Jawa Barat. Energi panas bumi di Kamojang merupakan salah satu sumber energi terbarukan di Indonesia yang sangat membantu dalam suplai kebutuhan listrik di Indonesia terutama untuk penduduk lokal Kamojang, Jawa Barat. Sifat energi terbarukan adalah selalu ada dan bisa diperbaharui namun membutuhkan pengelolaan yang baik agar energi panas bumi bisa terus digunakan secara berkelanjutan. Dalam studi kasus manajemen energi panas, salah satunya adalah memelihara sumber energi panas dengan cara melakukan monitoring reservoir panas bumi. Pada kasus ini diperlukan kemampuan teknis berupa pemahaman tentang reservoir panas bumi. Pemantauan reservoir dilakukan untuk melihat bahwa reservoir masih dalam kondisi baik, aman dan bisa berfungsi serta mampu menghasilkan panas secara terus-menerus.

DAFTAR PUSTAKA

Abduh, J. M. A. M., Nifinluri, J. N., Kadar, A. N., Akhmad, U. Q. P., & Nurannisa, S. R. (2023). Penataan Lingkungan Permukiman Rawan Banjir Dengan Pendekatan Partisipatif Di Kawasan Sub Urban Kota Makassar. *Jurnal Pelita Kota*, *4*(1), 345–362.

Abouemara, K., Shahbaz, M., Mckay, G., & Al-Ansari, T. (2024). The review of power generation from integrated biomass gasification and solid oxide fuel cells: current status and future directions. Fuel, 360, 130511, https://doi.org/10.1016/J. FUEL.2023.130511.

Adams, P., Bridgwater, T., Lea-Langton, A., Ross, A., & Watson, I. (2018). Biomass conversion technologies. Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems, 107–39, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101036-5.00008-2.

Akhtar, N., Ishak, M.I.S., Bhawani, S.A., Umar, K. 2021. Various Natural and Anthropogenic Factors Responsible for Water Quality Degradation: A Review. *Water*, 13, 2660. https://doi.org/10.3390/w13192660

Alam, M. J., Rengasamy, N., bin Dahalan, M. P., Halim, S. A., & Nath, T. K. (2022). Socio-economic and ecological outcomes of a community-based restoration of peatland swamp forests in Peninsular Malaysia: A 5Rs approach. *Land Use Policy*, *122*, 106390. https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2022.106390

Álvarez-Álvarez, L., Vitelli-Storelli, F., Rubín-García, M., García, S., Bouzas, C., Ruíz-Canela, M., Corella, D., Salas-Salvadó, J., Fitó, M., Martínez, J. A., Tojal-Sierra, L., Wärnberg, J., Vioque, J., Romaguera, D., López-Miranda, J., Estruch, R., Tinahones, F. J., Santos-Lozano, J. M., Serra-Majem, L., … Martín-Sánchez, V. (2024). Impact of mediterranean diet promotion on environmental sustainability: a longitudinal analysis. *Public Health*, *230*, 12–20. https://doi.org/10.1016/J.PUHE.2024.02.010

Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2006). The twelve principles of green engineering as a foundation for sustainability. In *Sustainability Science and Engineering* (Vol. 1, pp. 11-32). Elsevier.

Andersson, K., Dickin, S., & Rosemarin, A. (2016). Towards "sustainable" sanitation: challenges and opportunities in urban areas. *Sustainability*, *8*(12), 1289.

Andrade, G. I., Rhodes, J. R., & Amano, T. (2020). How effective is the global protected area network in preserving forest ecosystem services? Conservation Letters, 13(3), e12700. DOI: 10.1111/conl.12700.

Andri, Y. (2023). *Mengenal Green Tech, Inovasi Teknologi Ramah Lingkungan*. https://www.idntimes.com/tech/trend/andri-andreas-1/mengenal-green-tech-c1c2

Angelsen, A., & Kaimowitz, D. (2019). Deforestation trends in the tropics: Reconciling economic, social and environmental factors. Environmental Research Letters, 14(1), 1-15. DOI: 10.1088/1748-9326/ab57c4.

Anshariah, Widodo, S., & Nuhung, R. (2015). Studi Pengelolaan Air Asam Tambang Pada Pt. Rimau Energy Mining Kabupaten Barito Timur Provinsi Kalimantan Tengah. *Jurnal Geomine*, *1*, 46–54.

Anwar Daud, Arif Atul Mahmudah Dullah. (2013). *Prespektif Analisis Risiko Lingkungan dan Kesehatan*

Ardi, M. 1992. *Kualitas Lingkungan Hidup Indonesia*. Jakarta: Kantor Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup.

Ari, W. (2020). *Teknologi Ramah Lingkungan: Contoh dan Fungsinya*. https://www.kompas.com/skola/read/2020/02/27/120000169/teknologi-ramah-lingkungan-contoh-dan-fungsinya

Arya, T. (2023). *Manajemen Energi Terbarukan*. PT Gramedia Pustaka Utama.

Asdak, C., Agung, S., & Sudaryanto, S. (2020). Strategi pengelolaan sumber daya air berbasis DAS dalam mendukung konservasi air.

Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, 10(2), 246-255. DOI: 10.29244/jpsl.10.2.246-255.

Ashley, R. (2009). Briefing: NG Semple's 'Principles of environmental protection'. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability* (Vol. 162, No. 1, pp. 3-11). Thomas Telford Ltd.

Asnaghi, V., Chiantore, M., Mangialajo, L., Gazeau, F., Francour, P., Alliouane, S., & Gattuso, J.P. (2013). Cascading effects of ocean acidification in a rocky subtidal community. PLoSOne, 8, 4. doi: 10.1371/journal.pone.0061978.

Awe, Y., Hagler, G., Kleiman, G., Klopp, J., Pinder, R., Terry, S., 2017. Filling the gaps:Improving measurement of ambient air quality in low and middle income countries.White paper. Discussion draft.

AWI, Lohmann. G. (2020). Major wind-driven ocean currents are shifting toward. Alfred-Wegener-Institut (AWI); 2020 https://phys.org/news/2020-09-major-winddriven-ocean-currents-shifting.html.

Azapagic, A. (2003). Systems approach to corporate sustainability: a general management framework. *Process Safety and Environmental Protection*, *81*(5), 303-316.

Babaei, M. A., Hasanzadeh, S., & Karimi, H. (2024). Cooperative energy scheduling of interconnected microgrid system considering renewable energy resources and electric vehicles. *Electric Power Systems Research*, *229*, 110167. https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2024.110167

Bahadorestani, A., Naderpajouh, N., & Sadiq, R. (2020). Planning for sustainable stakeholder engagement based on the assessment of conflicting interests in projects. *Journal of Cleaner Production*, *242*, 118402.

Balshem, H., Helfand, M., Schünemann, H.J., Oxman, A.D., Kunz, R., Brozek, J., Vist, G.E., Falck-Ytter, Y., Meerpohl, J., Norris, S., Guyatt, G.H., 2011. GRADE guidelines: 3. Rating the quality of

evidence. J. Clin. Epidemiol. 64, 401–406. https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2010.07.015.

Bamisile, O., Dagbasi, M., Babatunde, A., & Ayodele, O. (2017). A review of renewable energy potential in Nigeria; solar power development over the years. Engineering and Applied Science Research, 44, 242.

Barker, S., & Ridgwell, A. (2012). Ocean acidification. Nat Educ Knowl, 3, 10, 21 https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/ocean-acidification-25822734.

Barlow, J., Lennox, G. D., Ferreira, J., Berenguer, E., Lees, A. C., Mac Nally, R., ... & Ewers, R. M. (2019). Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. Nature, 535(7610), 144-147. DOI: 10.1038/nature18326.

Bazyar, J., Pourvakhshoori, N., Khankeh, H., Farrokhi, M., Delshad, V., Rajabi, E., 2019. A comprehensive evaluation of the association between ambient air pollution and adverse health outcomes of major organ systems: a systematic review with a worldwide approach. Environ. Sci. Pollut. Res. 26, 12648–12661. https://doi.org/10.1007/s11356-019-04874-z.

Becker, C., Chitchyan, R., Duboc, L., Easterbrook, S., Penzenstadler, B., Seyff, N., & Venters, C. C. (2015, May). Sustainability design and software: The karlskrona manifesto. In *2015 IEEE/ACM 37th IEEE International Conference on Software Engineering* (Vol. 2, pp. 467-476). IEEE.

Benavides-Franco, J., Gómez, J. M., & Pérez-Uribe, M. A. (2023). Determinants of Project Finance success for renewable energy. *Renewable Energy*, *211*, 188–201. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.04.031

Bergougui, B., & Aldawsari, M. I. (2024). Asymmetric impact of patents on green technologies on Algeria's Ecological Future. *Journal of Environmental Management*, *355*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120426

Bernstein, J. H. (2015). Transdisciplinarity: A review of its origins, development, and current issues.

Bielefeldt, A. R. (2018). Professional social responsibility in engineering. *Social responsibility*, *41*.

Borowy, I. (2016). The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) is a paradox. 1 It has existed for more than fifty years, its current members produce approximately 60 per cent of global goods and services, and it is one of the most important sources of international data and analyses on a broad range of topics. Nonetheless, as an. *International Organizations and Environmental Protection: Conservation and Globalization in the Twentieth Century*, *11*, 211.

Borroy Vicente, S., Marquina Cordero, D., Llombart Estopiñán, A., Zorita Lamadrid, Á., & Hernandez-Callejo, L. (2023). Technical evaluation of European and North American sustainable benchmark scenarios based on renewable Local energy Communities penetration. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *60*, 103556. https://doi.org/10.1016/J.SETA.2023.103556

Bours, D., McGinn, C., & Pringle, P. (2013). Monitoring & evaluation for climate change adaptation: A synthesis of tools, frameworks and approaches.

Bowman, D. M., Williamson, G. J., & Abatzoglou, J. T. (2019). Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. Nature Ecology & Evolution, 3(5), 758-765. DOI: 10.1038/s41559-019-0868-6.

Brothers, C.J., Van Der Pol, W.J., Morrow, C.D., Hakim, J.A., Koo, H., & Mcclintock, J.B. (2018). Ocean warming alters predicted microbiome functionality in a common sea urchin. Proc R Soc B, 285, 1881. doi: 10.1098/rspb.2018.0340.

Brown, R., Durst, P., & Gross, C. (2019). Hydropower as a renewable and sustainable energy resource meeting global energy challenges in a

reasonable way. International Journal of Hydropower & Dams, 26(2), 36-43. DOI: 10.14359/51723007.

Brown, S., & Lugo, A. E. (1994). Rehabilitation of tropical lands: a key to sustaining development. *Restoration ecology*, *2*(2), 97-111.

Budiharto, I.W., Bayu, P.H. & Adinda C.S.2023. Penggunaan Teknik Bioventing Filtrasi Sederhana Dengan Penambahan Em4 (*Effective Microorganisms*) Terhadap Pengolahan Air Limbah Penatu. Jurnal Sains Terapan : Wahana Informasi dan Alih Teknologi Pertanian, 13 (1) : 48 – 59 (2023) DOI : 10.29244/jstsv.13.1.48-59.

Campanati, C., Dupont, S., Williams, G.A., & Thiyagarajan, V. (2018). Differential sensitivity of larvae to ocean acidification in two interacting mollusc species. Mar Environ Res, 141, 66–74. doi: 10.1016/j.marenvres.2018.08.005.

Campbell-Lendrum, D., Prüss-Ustün, A., 2019. Climate change, air pollution and noncommunicable diseases. Bull. World Health Organ. 97, 160–161. https://doi.org/10.2471/BLT.18.224295.

Canney, N., & Bielefeldt, A. (2015). A framework for the development of social responsibility in engineers. *International Journal of Engineering Education*, *31*(1B), 414-424.

Catalano, G. D. (2022). *Engineering ethics: Peace, justice, and the earth*. Springer Nature.

Catalano, G. D. (2022). *Engineering ethics: Peace, justice, and the earth*. Springer Nature.

Çelik, O., & McInnes, C. R. (2024). A constellation design for orbiting solar reflectors to enhance terrestrial solar energy. *Acta Astronautica*, *217*, 145–161. https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2024.01.031

Chandramohan, T., Balchand, A.N, Mathew., Samson. 2009. Discharge and Sediment Transport In The Tropical Rivers Of Kerala, India And Their Controlling Factors. *Asian Journal Of Water, Environment And Pollution*, 6 (4): 1-9.

Chazdon, R. L., Brancalion, P. H., Laestadius, L., Bennett-Curry, A., Buckingham, K., Kumar, C., ... & Uriarte, M. (2020). The potential for species conservation in tropical secondary forests. Conservation Biology, 34(5), 1112-1123. DOI: 10.1111/cobi.13520.

Chen, J., Hoek, G., 2020. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis. Environ. Int. 143, 105974 https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974 (this issue).

Cheng, L. (2017). Improved estimates of ocean heat content from 1960 to 2015. Sci Adv, 3, 3. doi: 10.1126/sciadv.1601545.

Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D., & Unnikrishnan, A.S. (2013). The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Coglianese, C., & Nash, J. (Eds.). (2001). *Regulating from the inside: Can environmental management systems achieve policy goals?*. Resources for the Future.

Cohen, A.J., Samet, J.M., Straif, K., IARC, 2013. Air pollution and cancer. International Agency for Research on Cancer, Lyon.

Colombo, S., Sánchez-Martínez, J. D., & Perujo-Villanueva, M. (2020). The trade-offs between economic efficiency and job creation in olive grove smallholdings. *Land Use Policy*, *96*, 104696. https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2020.104696

Cooper, C. D., & Alley, F. C. (2010). *Air pollution control: A design approach*. Waveland press.

Cromar, K.R., Duncan, B.N., Bartonova, A., Benedict, K., Brauer, M., Habre, R., Hagler, G.S.W., Haynes, J.A., Khan, S., Kilaru, V., Liu, Y., Pawson, S., Peden, D.B., Quint, J.K.,Rice, M.B., Sasser, E.N., Seto, E., Stone, S.L., Thurston, G.D., Volckens, J., 2019. Air pollution monitoring for health research and patient care. An Official American Thoracic Society Workshop Report. Annals of the American Thoracic Society 16, 1207–1214. https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201906-477ST.

Dadan, Rukandar. (2018). Banjir (Pengertan, penyebab, dampak dan pennggulangannya). *Radar Banten*.

Danang, E., Sarwono., Singgih, P. 2009. *Geografi 1*. Jakarta.

Davis, M. (2017). Thinking like an engineer: The place of a code of ethics in the practice of a profession. In *Engineering Ethics* (pp. 295-312). Routledge.

Dede, H. (2023). *Penanganan Limbah yang Sesuai dengan Konsep Lingkungan Yaitu: Solusi untuk Kelestarian Bumi - solid.or.id*. https://solid.or.id/penanganan-limbah-yang-sesuai-dengan-konsep-lingkungan-yaitu/

Despasya, Y. (2022). *Berbagai Macam Pilihan Produk Ramah Lingkungan | Cleanipedia*. https://www.cleanipedia.com/id/kepedulian-lingkungan/berbagai-macam-pilihan-produk-ramah-lingkungan.html

Diji, C.J. (2013). Electricity production from biomass in Nigeria: options, prospects and challenges. Adv Mater Res, 824. https://doi.org/10.4028/www. scientific.net/AMR.824.444.

Ditton, R. B., Holland, S. M., & Matthews, T. L. (2019). Recreational boating in the United States: Current trends and issues. Journal of Leisure Research, 51(1), 1-18. DOI: 10.1080/00222216.2019.1684085.

Dreyer, M., Chefneux, L., Goldberg, A., Heimburg, J. V., Patrignani, N., Schofield, M., & Shilling, C. (2017). Responsible innovation: A complementary view from industry with proposals for bridging different perspectives. *Sustainability*, *9*(10), 1719.

Druschke, C. G., & Hychka, K. C. (2015). Manager perspectives on communication and public engagement in ecological restoration project success. *Ecology and Society*, *20*(1).

Duran, D. C., Artene, A., Gogan, L. M., & Duran, V. (2015). The objectives of sustainable development-ways to achieve welfare. *Procedia Economics and Finance*, *26*, 812-817.

Effendi, Y. R. (2023). Kepemimpinan ekologis dalam membangun kesadaran merawat lingkungan hijau. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, *1*(2), 43-48.

Electrical Technology. Wind Power Plant - Types of Wind Turbines and Generators. Electrical Technology n.d. https://www.electricaltechnology.org/ 2021/08/wind-power-plant.html

Elkezza, O., Mohamed, M., & Khan, A. (2022). Performance of thermally enhanced geo-energy piles and walls. *Geothermics*, *98*, 102274. https://doi.org/10.1016/J.GEOTHERMICS.2021.102274

Elliot, J. 2006. *An Introduction to Sustainable Development Third Edition. London and New York*. Fischetti,

European Commission. (2023). *Renewable Energy: Key Policy Documents*.

Evangelopoulos, D., Perez-Velasco, R., Walton, H., Gumy, S., Williams, M., Kelly, F.J., Künzli, N., 2020. The role of burden of disease assessment in tracking progress towards achieving WHO global air quality guidelines. Int. J. Public Health 65 (8), 1455–1465. https://doi.org/10.1007/s00038-020-01479-z. Fussell, J.C., Kelly, F.J., 2021. Mechanisms underlying the health effects of desert sand dust. Environ. Int. 157, 106790 https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106790 (this issue).

Fadillah Muhamad, Kania Dewi S, Ma'ruf Abi L. (2020). Peran Pemerintah dalam Pelaksanaan Mitigasi Bencana. *Magistra Law Review Volume 01 Nomor 02*

Fajar, L. (2024). *9 Contoh Bahan Bakar Ramah Lingkungan beserta Penjelasannya untuk Mengurangi Dampak Pemanasan Global – Blog*

Mamikos. https://mamikos.com/info/contoh-bahan-bakar-ramah-lingkungan-pljr/

Falkner, R. (2016). The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. *International Affairs*, *92*(5), 1107-1125.

Fandari, A. El, Daryanto, A., & Suprayitno, G. (2014). Pengembangan Energi Panas Bumi yang Berkelanjutan. *JURNAL ILMIAH SEMESTA TEKNIKA*, *17*(1), 68–82.

Félix, R., Orozco-Fontalvo, M., & Moura, F. (2023). Socio-economic assessment of shared e-scooters: do the benefits overcome the externalities? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *118*, 103714. https://doi.org/10.1016/J.TRD.2023.103714

Ferreira, V., Fabregat-Aibar, L., Pié, L., & Terceño, A. (2022). Research trends and hotspots in bioeconomy impact analysis: a study of economic, social and environmental impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, *96*, 106842. https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2022.106842

Findayani, Aprilia. (2015). Kesiapsiagaan Masyarakat Dalam penanggulangan Banjir di kota Semarang. *Jurnal Geografi UNNES, 12 No 1*, 103-114.

Fitzer, S.C., Caldwell, G.S., Close, A.J., Clare, A.S., Upstill-Goddard, R.C., & Bentley, M.G. (2012). Ocean acidification induces multi-generational decline in copepod naupliar production with possible conflict for reproductive resource allocation. J Exp Mar Biol Ecol, 30, 6, 418-419. doi: 10.1016/j.jembe.2012.03.009.

Fortuna, M. E., Simion, I. M., Ghinea, C., Petraru, M., Cozma, P., Apostol, L. C., ... & Gavrilescu, M. (2012). Analysis and management of specific processes from environmental engineering and protection based on sustainability indicators. *Environmental Engineering and Management Journal*, *11*(2), 333-350.

García, I. C. G., Fernández-Guillamón, A., García-Cascales, M. S., & Molina-García, Á. (2024). Multi-factorial methodology for Wind Power Plant repowering optimization: A Spanish case study.

Energy Reports, *11*, 179–196. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.11.044

Glushkov, D., Nyashina, G., Shvets, A., Pereira, A., & Ramanathan, A. (2021). Current status of the pyrolysis and gasification mechanism of biomass. *Energies*, *14*(22), 7541.

Graham, N.A.J., Wilson, S.K., Jennings, S., Polunin, N.V.C., Bijoux, J.P., & Robinson, J. (2006). Dynamic fragility of oceanic coral reef ecosystems. Proc Natl Acad Sci, 103, 22, 8425–9. doi: 10.1073/pnas.0600693103.

Grimble, R., & Wellard, K. (1997). Stakeholder methodologies in natural resource management: a review of principles, contexts, experiences and opportunities. *Agricultural systems*, *55*(2), 173-193.

Grizzetti, B., Lanzanova, D., Liquete, C., Reynaud, A., & Cardoso, A. C. (2016). Assessing water ecosystem services for water resource management. *Environmental Science & Policy*, *61*, 194-203.

Grogan, M.E., Alves-de-Souza, H.C., Cahoon, L.B., Mallin, M.A. 2023. Harmful Algal Blooms: A Prolific Issue in Urban Stormwater Ponds. *Water*, (15):2436. https:// doi.org/10.3390/w15132436.

Guo, L., & Tan, W. (2024). Analyzing the synergistic influence of green credit and green technology innovation in driving the Low-Carbon transition of the energy consumption structure. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *63*, 103633. https://doi.org/10.1016/J.SETA.2024.103633

Gutierrez-Martin, F., & Dahab, M. F. (1998). Issues of sustainability and pollution prevention in environmental engineering education. *Water science and technology*, *38*(11), 271-278.

Hadi, P., Wicaksono, P., & Susanto, H. (2019). Impact of industrial wastewater on water quality in the Brantas River. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 352(1), 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/352/1/012020.

Halbe, J., Adamowski, J., & Pahl-Wostl, C. (2015). The role of paradigms in engineering practice and education for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, *106*, 272-282.

Hale, R., Calosi, P., McNeill, L., Mieszkowska, N., & Widdicombe, S. (2011). Predicted levels of future ocean acidification and temperature rise could alter community structure and biodiversity in marine benthic communities. Oikos, 120, 5, 661–74. doi: 10.1111/j.1600-0706.2010.19469.x.

Hamdani, Budi Satria. (2017). Pengetahuan Manajemen Risiko Bencana Gempa Bumi Pada Kelompok Lansia di Desa Lampulo Kecamatan Kuta Alam Kota Banda Aceh. *Jurnak keperawatan Unsyah*.

Handfield, R. B., Melnyk, S. A., Calantone, R. J., & Curkovic, S. (2001). Integrating environmental concerns into the design process: the gap between theory and practice. *IEEE transactions on Engineering Management*, *48*(2), 189-208.

Hassanzadegan, A., & Mooi, E. A. (2023). What drives technology licenses to contain (non-)legally enforceable contracting? *Industrial Marketing Management*, *108*, 223–236. https://doi.org/10.1016/J.INDMARMAN.2022.11.016

Haughton, G. (2021). Environmental justice and the sustainable city. In *The Earthscan reader in sustainable cities* (pp. 62-79). Routledge.

Hebling, D.E. (2015). Bioremediation of pesticide-contaminated water resources: the challenge of low concentrations. Current Opinion in Biotechnology. 33:142-148. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958166915000312

Henim, L., & Pearce, S. (2019). Sistem Pengolahan Air Asam Tambang Dari Material Waste Dan Aplikasi Model Enkapsulasi Pada Bendungan TSF Di Tambang Emas. *PROSIDING TPT XXVIII PERHAPI 2019*, 771 – 784.

Heryati, Sri. (2020). Peran Pemerintah Daerah Dalam Penanggulangan Bencana. *Jurnal Pemerintahan Dan Keamanan Publik (JP dan KP)*, 139-146. doi: 10.33701/jpkp.v2i2.1088

Hidayat, B. 2015. Bioremediasi Tanah Tercemar Logam Berat Menggunakan Biochar. Jurnal Pertanian Tropik Vol.2, No.1. April 2015. (7) : 31- 41 DOI: https://doi.org/10.32734/jpt.v2i1.2878

Hilyah, A., & Utama, W. (2016). Pengaruh Patahan Dan Induksi Seismik Pada Sistem Geothermal Studi Kasus Lapangan Geothermal Kamojang. *Jurnal Geosaintek*, *2*(1), 39–44.

Horton, R., Beaglehole, R., Bonita, R., Raeburn, J., McKee, M., & Wall, S. (2014). From public to planetary health: a manifesto. Lancet N Am Ed, 383(9920):847.

Hossain, M. S., Rahman, M. A., & Roy, M. K. (2020). Climate change impact assessment on surface water resources in the Teesta River basin, Bangladesh. Climate Risk Management, 30, 100255. DOI: 10.1016/j.crm.2020.100255.

Huangfu, P., Atkinson, R., 2020. Long-term exposure to NO2 and O3 and all-cause and respiratory mortality: a systematic review and meta-analysis. Environ. Int. 144, 105998 https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105998 (this issue).

Huesemann, M. H. (2003). The limits of technological solutions to sustainable development. *Clean technologies and environmental policy*, *5*, 21-34.

Hultcrantz, M., Rind, D., Akl, E.A., Treweek, S., Mustafa, R.A., Iorio, A., Alper, B.S.,Meerpohl, J.J., Murad, M.H., Ansari, M.T., Katikireddi, S.V., Ostlund, ¨ P.,Tranæus, S., Christensen, R., Gartlehner, G., Brozek, J., Izcovich, A., Schünemann, H., Guyatt, G., 2017. The GRADE Working Group clarifies the construct of certainty of evidence. J. Clin. Epidemiol. 87, 4–13. https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2017.05.006. https://www.who.int/news.

Husen, A. (2009). Manajemen proyek.

Ibrahim, N., Afandi, G.El. 2020. Phytoremediation uptake model of heavy metals (Pb, Cd, and Zn) in soil using Nerium olender Heliyon 6 (7),e04445

Ibrahim, R. K., Hayyan, M., AlSaadi, M. A., Hayyan, A., & Ibrahim, S. (2016). Environmental application of nanotechnology: air, soil, and water. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*, 13754-13788.

IEA. (2023). *World Energy Outlook 2023*.

IPCC. (2019). Summary for policymakers. In: IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate [H.O. P€ortner, D.C. Roberts, V. Masson- Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]. In press. https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/ SROCC_FinalDraft_FullReport.pdf

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

IRENA. (2023). *Renewable Energy Capacity Reaches Record High in 2022*.

Irma Jesika Dianti, Anekke Oliij Kereh, Lambonan Marthin. (2017). Tanggung Jawab Pemerintah dalam Menyediakan Dana Penanggulangan Bencana Menurut UU No.24 Tahun 2007.

Jain, R., Urban, L., Balbach, H., & Webb, M. D. (2012). *Handbook of environmental engineering assessment: strategy, planning, and management*. Butterworth-Heinemann.

Jaskulak, M., Grobelak, A., Vandenbulcke, F., 2020. Modelling assisted Phytoremediation of soil contaminated with heavy metals-main opportunities, limitations, decision making and future prospects. Chemosphere 249, 126196

Jennings, B., & Stadler, R. (2015). Resource management in clouds: Survey and research challenges. *Journal of Network and Systems Management*, *23*, 567-619.

Joan, I. (2024). *Teknologi Ramah Lingkungan dan Contohnya*. https://mediaindonesia.com/humaniora/642965/teknologi-ramah-lingkungan-dan-contohnya

Jones, R. N. (2001). An environmental risk assessment/management framework for climate change impact assessments. *Natural hazards*, *23*(2), 197-230.

Juani, R., Dorojatun, H. (2019). Manajemen Risiko Bencana untuk Bangunan Infrastruktur. https://www.djkn.kemenkeu.go.id/artikel/baca/12747/Manajemen-Risiko-Bencana-Untuk-Pembangunan-Infrastruktur.html

K, Arsyad M. (2017). Modul Manajemen Penanggulangan Bencana Pelatihan Penanggulangan Bencana Banjir.

Kanagamani, K., Geethamani, P., & Narmatha, M. (2020). Hazardous waste management. In *Environmental Issues and Sustainable Development*. IntechOpen.

Kania, P. (2023). *Green Computing dan Peranannya dalam Pencapaian Energi yang Terjangkau dan Bersih - Kompasiana.com*. https://www.kompasiana.com/kaniaputrioctavia9587/65640533c57afb77a42c10e9/green-computing-dan-peranannya-dalam-pencapaian-energi-yang-terjangkau-dan-bersih

Kayima, P., Semakula, H. M., Wasswa, H., Mugagga, F., & Mukwaya, P. I. (2023). Analysis of the socio-economic benefits of on-grid hybrid solar energy system on Bugala island in Uganda. *Energy for Sustainable Development*, *77*, 101332. https://doi.org/10.1016/J.ESD.2023.101332

Kehinde, O., Babaremu, K., Akpanyung, K.V., Remilekun, E., Oyedele, S.T., & Oluwafemi, J. (2018). Renewable energy in Nigeria-a review, Int. J. Mech. Eng. Technol, 9, 1085.

Keith, D. A., Williams, J. E., & Woinarski, J. C. Z. (2002). Fire management and biodiversity conservation: key approaches and principles. *Flammable Australia: the fire regimes and biodiversity of a continent*, 401-425.

Kementerian ESDM. (2021). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

Ketut Sundra, O. I., (2017). *Pengelolaan Sumber Daya Hutan*. Jurusan Biologi, Ms.

Khalili, N. R., & Duecker, S. (2013). Application of multi-criteria decision analysis in design of sustainable environmental management system framework. *Journal of Cleaner Production*, *47*, 188-198.

Kihuha, P. E. N. I. N. A. H. (2018). Monitoring and evaluation practices and performance of global environment facility projects in Kenya, A case of United Nations environment programme. *Unpublished master's thesis). Kenyatta University, Nairobi, Kenya*.

Kimsan, M. (2023). *Stabilita || Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Konstruksi Gedung dan Dampak Lingkungan : Sebuah Review* (Vol. 11, Issue 3).

Kindo, M. D., Adams, A. A., & Mohammed, J. (2024). The impact of trade on environmental quality and sustainable development in Ghana. *World Development Sustainability*, *4*, 100134. https://doi.org/10.1016/J.WDS.2024.100134

Krishna, I. M., Manickam, V., Shah, A., & Davergave, N. (2017). *Environmental management: science and engineering for industry*. Butterworth-Heinemann.

Krokhina, J. A., Vinogradova, T., Grishnova, E. Y., Zhdanov, S. P., Borisova, O. V., Ostanin, L. M., ... & Kutlin, N. G. (2018). Environmental Risk Management System Projecting Of Industrial Enterprises. *Ekoloji Dergisi*, (106).

Kumar, A., Bhattacharya, T., Hasnain, S. M., Nayak, A. K., & Hasnain, M. S. (2020). Applications of biomass-derived materials for energy production, conversion, and storage. *Materials Science for Energy Technologies*, *3*, 905-920.

Kumar, M., Bolan, N.S., Hoang, S.A., Sawakar, A.D., Jasemizad, T., Goa, B. (2021). Remediation of soil and sediments polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons to immobilize or degrade. J. Hazard mater, 420.126534

Laila, F. (2023). *10 Bahan Bakar Ramah Lingkungan, Yuk Jaga Kelestarian Alam!* https://solarindustri.com/blog/bahan-bakar-ramah-lingkungan/

Laksminingpuri, N., & Martinus, A. (2013). Studi Kandungan Dan Temperatur Gas Panas Bumi Kamojang Dengan Diagram Grid. *Majalah Ilmiah Aplikasi Isotop Dan Radiasi*, *4*(2), 69–79.

Laufk€otter, C., Fr€olicher, T.L., & Zscheischler, J. (2020). High-impact ocean heatwaves attributable to human-induced global warming. Science. 369, 6511. doi: 10.1126/ science.aba0690.

Lee, D., Chiang, Y., Chen, Y.-T., & Tsai, H.-H. (2024). Impacts of battery energy storage system on power grid smartness: Case study of Taiwan Power Company. *Journal of Energy Storage*, *86*, 111188. https://doi.org/10.1016/J.EST.2024.111188

Lee, J.H., 2013. Anoverview of phytoremediation as apotential promising technology for environmental pollution control. Biotechnol Bioproc E 18, 431-439

Legionosuko, T., Madjid, M. A., Asmoro, N., & Samudro, E. G. (2019). Posisi dan strategi indonesia dalam menghadapi perubahan iklim guna mendukung ketahanan nasional. *Jurnal Ketahanan Nasional*, *25*(3), 295-312.

Lei, K., Pan, H., & Lin, C. (2016). A landscape approach towards ecological restoration and sustainable development of mining areas. *Ecological Engineering*, *90*, 320-325.

Leveson, N. G. (2016). *Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety* (p. 560). The MIT Press.

Lewis, S.L., & Maslin, M.A. (2015). A transparent framework for defining the Anthropocene Epoch. Anthr Rev, 2, 2, 128–46. doi: 10.1177/2053019615588792.

Li, C., Ahmad, S. F., Ahmad Ayassrah, A. Y. A. B., Irshad, M., Telba, A. A., Mahrous Awwad, E., & Imran Majid, M. (2023). Green production and green technology for sustainability: The mediating

role of waste reduction and energy use. *Heliyon*, *9*(12), e22496. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E22496

Li, H., Wang, Y., & Zhang, L. (2021). The role of forests in providing clean water. International Journal of Environmental Science, 8(1), 102-115. DOI: 10.6088/ijes.8105.

Li, S., Zhang, S., Tang, S., Duan, S., Shao, Q., Zhan, Q., & Jin, K. (2024). Global patterns of the interactive effects of N and P enrichment on terrestrial microbial biomass. *Ecological Indicators*, *160*, 111771. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2024.111771

Liang, P., Guo, Y., Nutakki, T. U. K., Agrawal, M. K., Muhammad, T., Ahmad, S. F., Bani Ahmad, A. Y. A., & Qin, M. (2024). Comprehensive assessment and sustainability improvement of a natural gas power plant utilizing an environmentally friendly combined cooling heating and power-desalination arrangement. *Journal of Cleaner Production*, *436*, 140387. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.140387

Litvinenko, V., Bowbrick, I., Naumov, I., & Zaitseva, Z. (2022). Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, *338*, 130530.

Loucks, D. P., van Beek, E., Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017). Water resources planning and management: An overview. *Water resource systems planning and management: an introduction to methods, models, and applications*, 1-49.

Luegenbiehl, H. C. (2017). Codes of ethics and the moral education of engineers. In *Engineering Ethics* (pp. 475-495). Routledge.

Madeira, D., Ara ujo, J., Vitorino, R., Capelo, J., Vinagre, C., & Diniz, M. (2016). Ocean warming alters cellular metabolism and induces mortality in fish early life stages: a proteomic approach. Environ Res, 148, 164–76. doi: 10.1016/j.envres.2016.03.030.

Majidi Nezhad, M., Neshat, M., Sylaios, G., & Astiaso Garcia, D. (2024). Marine energy digitalization digital twin's approaches. *Renewable*

and Sustainable Energy Reviews, *191*, 114065. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.114065

Mangunjaya, F. M. (2006). *Hidup harmonis dengan alam: esai-esai pembangunan lingkungan, konservasi, dan keanekaragaman hayati Indonesia*. Yayasan Pustaka Obor Indonesia.

Manikandan, S., Subbaiya, R., Saravanan, M., Ponraj, M., Selvam, M., & Pugazhendhi, A. (2022). A critical review of advanced nanotechnology and hybrid membrane based water recycling, reuse, and wastewater treatment processes. *Chemosphere*, *289*, 132867.

Marba, N., & Duarte, C.M. (2010). Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality. Glob Chang Biol, 16, 8, 2366–75. doi: 10.1111/ j.1365-2486.2009.02130.x.

Marfuah, Marfuah, Cempaka, Sinta, Risdan Ardiansyah, Ahmad, Rahmawati, Laila, Yunia Rediana, Made, & Koswara, Risandi. (2021). Kebijakan Pemerintah dalam Penanggulangan Bencana di Indonesia. *Jurnal Studi Ilmu Sosial dan Politik, 1*(1), 35-45. doi: 10.35912/jasispol.v1i1.184

Maulida, S. A., & Purwanti, I. F. (2023). Kajian Pengolahan Air Asam Tambang Industri Pertambangan Batu Bara dengan Constructed Wetland. *JURNAL TEKNIK ITS*, *12*(1), 46–51.

Maziliauske, E. (2024). Innovation for sustainability through co-creation by small and medium-sized tourism enterprises (SMEs): Socio-cultural sustainability benefits to rural destinations. *Tourism Management Perspectives*, *50*, 101201. https://doi.org/10.1016/J.TMP.2023.101201

Mazzurco, A., & Jesiek, B. K. (2017). Five guiding principles to enhance community participation in humanitarian engineering projects. *Journal of Humanitarian Engineering*, *5*(2).

MBARI. Climate change and the ocean. Monterey Bay Aquarium Research Institute; 2019 https://phys.org/news/2019-09-climate-ocean.html.

McCormick, M.I, Watson, S.A., & Munday, P.L. (2013). Ocean acidification reverses competition for space as habitats degrade. Sci Rep, 3,1, 1–6. doi: 10.1038/srep03280.

Meyfroidt, P., Lambin, E. F., & Carlson, K. M. (2020). Agricultural and forestry expansion in the tropics: Drivers, patterns, and policy implications. Environmental Research Letters, 15(6), 1-17. DOI: 10.1088/1748-9326/ab864a.

Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2021). *Environmental engineering: Fundamentals, sustainability, design*. John wiley & sons.

Miller, T. F. (2018). A bio-inspired climb and glide energy utilization strategy for undersea vehicle transit. *Ocean Engineering*, *149*, 78–94. https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2017.11.048

Mines Jr, R. O. (2014). *Environmental engineering: principles and practice*. John Wiley & Sons.

Mirza, Z. T., Anderson, T., Seadon, J., & Brent, A. (2024). A thematic analysis of the factors that influence the development of a renewable energy policy. *Renewable Energy Focus*, *49*, 100562. https://doi.org/10.1016/J.REF.2024.100562

Mishra, B. K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S., & Gautam, A. (2021). Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions. *Water*, *13*(4), 490.

Mohammed, Y.S., Mustafa, M.W., Bashir, N., & Ibrahem, I.S. (2017). Existing and recommended renewable and sustainable energy development in Nigeria based on autonomous energy and microgrid technologies. Renew Sustain Energy Rev, 75, 820.

Morin, R. S., Dobrowski, S. Z., & Menakis, J. P. (2021). Climate change and forest health: Assessing impacts and identifying adaptive management strategies. Environmental Management, 67(2), 197-210. DOI: 10.1007/s00267-020-01301-7.

Mulder, K. (Ed.). (2017). *Sustainable development for engineers: A handbook and resource guide*. Routledge.

Murtiyanto, N. 2011. *Lingkungan Hidup Dan Ekologi*. WordPress.

Nabila, F. (2020). *Prinsip 6R : Langkah Sederhana Menyelamatkan Bumi | by Nabila Fathimatuzzahra | Medium*. https://medium.com/@nabilaftzhr/prinsip-6r-langkah-sederhana-menyelamatkan-bumi-f12ae3b4803d

Nasi, R., Sayer, J., Malla, Y., & Ferraro, P. J. (2019). Forest ecosystem services and the role of research in sustainable forest management. Annual Review of Environment and Resources, 44, 365-392. DOI: 10.1146/annurev-environ-101718-033146.

Nasibulina, A. (2015). Education for sustainable development and environmental ethics. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, *214*, 1077-1082.

Nena, Z. (2024). *Mengapa Bahan Bakar Fosil Harus Diganti? Ini Alasannya!* https://www.idntimes.com/science/discovery/nena-zakiah-1/mengapa-bahan-bakar-fosil-harus-diganti

Newman, R. S. (2016). *Love canal: A toxic history from colonial times to the present*. Oxford University Press.

Nisa, F. (2014). Manajemen Penanggulangan Bencana Banjir, Putting Beliung, Dan Tanah Longsor Di Kabupaten Jombang. *JKMP*, *2*(2), 103–220.

Nižetić, S., Šolić, P., Gonzalez-De, D. L. D. I., & Patrono, L. (2020). Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. *Journal of cleaner production*, *274*, 122877.

Nurhayati, D., Widayatno, B., & Subagio, A. (2020). Pengelolaan sumber daya air dalam perspektif kebijakan dan hukum lingkungan di Indonesia. Jurnal Ilmu Lingkungan, 18(2), 241-250. DOI: 10.14710/jil.18.2.241-250.

Obada, D.O., Kekung, M.O., Levonyan, T., & Norval, G.W. (2023). Palm oil mill derived empty palm fruit bunches as a feed stock for renewable energy applications in Nigeria: a review, Bioresour.

Technol Rep, 24, 101666, https://doi.org/10.1016/J. BITEB.2023.101666.

Obaideen, K., Mahmoud, M., Sayed, E. T., & Olabi, A. G. (2023). Socio-Economic Aspects of Green Materials. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15738-7.00010-6

Ogbonnaya, C., Abeykoon, C., Damo, U.M., & Turan, A. (2019). The current and emerging renewable energy technologies for power generation in Nigeria: a review. Therm Sci Eng Prog, 13, 10039.

Ojo, A.A., Awogbemi, O., & Ojo, A.O. (2020). An Overview of the Exploitation of Renewable Energy Resources in Nigeria. South Africa, and the United Kingdom. Energy, p. 10.

Oktaviani, R., Iskandar, A., & Siregar, D. (2019). Partisipasi masyarakat dalam konservasi sumber daya air: Kasus dari Kecamatan Cisarua, Kabupaten Bogor. Jurnal Wilayah dan Lingkungan, 7(2), 121-131.

Owen, D. (2021). Private facilitators of public regulation: A study of the environmental consulting industry. *Regulation & Governance*, *15*(1), 226-242.

Patil, A., Joseph, J., & Hawaldar, N. (2022). A review paper on solar energy-generated electricity. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, *10*.

Patil, A. (2024). Biopiles - Ex-situ Bioremediation Technique-Environment Notes. https://prepp.in/news/e-492-biopiles-exsitu-bioremediation-technique-environment-notes.

Pazzaglia, J., Santill an-Sarmiento, A., Helber, S.B., Ruocco, M., Terlizzi, A., Marín-Guirao, L., & Procaccini, G. (2020). Does warming enhance the effects of eutrophication in the seagrass *Posidonia oceanica*?. Front Mar Sci, 7. doi: 10.3389/fmars.2020.564805.

Peirano, A., Cocito, S., Banfi, V., Cupido, R., Damasso, V., Farina, G., Lombardi, C., Mauro, R., Morri, C., Roncarolo, I., Sald~a, Na. S., Savini, D., Sgorbini, S., Silvestri, C., Stoppelli, N., Torricelli, L., &

Bianchi, C.N. (2011). Phenology of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* (L.) Delile: medium and long-term cycles and climate inferences. Aquat. Bot, 94, 77–92. doi: 10.1016/j.aquabot.2010.11.007.

Poff, N. L., Olden, J. D., Merritt, D. M., & Pepin, D. M. (2020). Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(45), 28217-28222. DOI: 10.1073/pnas.2010104117.

Portner, H.O, Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., & Weyer, N.M. (2019). IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. In press; 2019. [(eds.)]Available at https://report.ipcc.ch/ srocc/pdf/SROCC_FinalDraft_Chapter4.pdf.

Pramudito, T., Sutjiningsih, D., & Prasetyo, L. B. (2019). Pengembangan teknologi irigasi hemat air untuk konservasi sumber daya air. Jurnal Irigasi, 14(1), 53-64.

Prayogo, N.A., Hidayati, A., Siregar, A.S., Yunasfi. 2016. Uji Toksisitas Letal dan Subletal Logam Berat Merkuri (Hg) Terhadap Ikan Nilem (*Osteochilus hasselti*). *Omni Akuatika*, 12(1):86-94.

Purnama, Gede Sang. (2018). Diktat Manajemen Bencana Program Studi Kesehatan Masyarakat Fakultas Kedokteran Universitas Udayana

Purwanto Sigit, Yugyasmono, Heniwati Wahyu. (2020). Buku Dasar Penggulangan Bencana dan Pengurangan Risiko Bencana.

Purwono. (2020). BANJIR.

R€olfer, L., Reuter, H., Ferse, S.C.A., Kubicek, A., Dove, S., Hoegh-Guldberg, O., & Bender-Champ, D. (2021). Coral-macroalgal competition under ocean warming and acidification. J Exp Mar Biol Ecol, 534, 151477. doi: 10.1016/j.jembe.2020.151477.

Raimi, M. O., Owobi, O. E., Anu, B., innocent Edewor, O. P., Odipe, O. E., Adio, Z., & Bilewu, O. O. (2019). Environmental Ethics Relevance to Public Health: Current Narratives and Implications for

Policy. *Environmental Ethics Relevance to Public Health: Current Narratives and Implications for Policy (December 1, 2019). Raimi Morufu Olalekan, Ochayi Ekoja Owobi, Babatunde Anu, Okolosi-Patani Innocent Edewor, Oluwaseun Emmanuel Odipe, Adio Zulkarnaini Olalekan and Bilewu Olaolu Oyinlola*.

Ralph, D. (2019). Concept of the natural structure of engineering training and the code of professional ethics of an engineer. *Высшее образование в России*, (1), 76-85.

Range, P., Chícharo, M.A., Ben-Hamadou, R., Pil o D, Matias, D., Joaquim, S., Oliveira, A.P., & Chícharo, L. (2010). Calcification, growth and mortality of juvenile clams Ruditapes decussatus under increased pCO2 and reduced pH: variable responses to ocean acidification at local scales? J Exp Mar Biol Ecol, 396, 2, 177–84. doi: 10.1016/j.jembe.2010.10.020.

Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: a literature review. *Biological conservation*, *141*(10), 2417-2431.

REN21. (2023). *Renewables 2023 Global Status Report*.

Revansyah, M. A., WMS, P., Putriyani, M., Ayu, N. P., Men, L. K., Setianto, Safriani, L., Fitrilawati, Syakir, N., & Aprilia, A. (2022). Analisis TDS, pH, Dan COD Untuk Mengetahui Kualitas Air Warga Desa Cilayung. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, *12*(2), 43–49.

Ricevuto, E., Vizzini, S., & Gambi, M.C. (2015). Ocean acidification effects on stable isotope signatures and trophic interactions of polychaete consumers and organic matter sources at a CO2 shallow vent system. J Exp Mar Biol Ecol, 468, 105–17. doi:10.1016/j.jembe.2015.03.016.

Rifqi, M. (2022). *Green Technology (Tech) Adalah: Pengertian, Manfaat, Macam, Contoh!* https://rifqimulyawan.com/blog/pengertian-green-technology/

Riti, J. S., & Shu, Y. (2016). Renewable energy, energy efficiency, and eco-friendly environment (RE 5) in Nigeria. *Energy, Sustainability and Society*, *6*, 1-16.

Rodrigues, S. M., Pereira, M. E., da Silva, E. F., Hursthouse, A. S., & Duarte, A. C. (2009). A review of regulatory decisions for environmental protection: Part I—Challenges in the implementation of national soil policies. *Environment International*, *35*(1), 202-213.

Rolston III, H. (2020). *A new environmental ethics: the next millennium for life on earth*. Routledge.

Ryan, M. (2020). In AI we trust: ethics, artificial intelligence, and reliability. *Science and Engineering Ethics*, *26*(5), 2749-2767.

Safani Jamhir, Indriani Lies Dkk. (2017). Dokumen PRB Prov. Sulawesi Tenggara.

Said, N. I. (2014). Teknologi Pengolahan Air Asam Tambang Batubara "Alternatif Pemilihan Teknologi." *JAI*, *7*(2).

Salim, A. Laporan Penelitian Perizinan AMDAL (KA Andal, Andal, RKL (Rencana Pengelolaan Lingkungan), dan RPL (Rencana Pemantauan Lingkungan), Andal Lalin, Berikut Persetujuan Teknis/Pertek) Air Limbah, Pertek Emisi Udara dengan SLO (Surat Kelayakan Operasi) nya serta perlu input dalam OSS di PTSP Provinsi Kegiatan Pembangunan Pabrik Minyak Kelapa mentah (Crude Coconut Oil/CCO) dan Fasilitasnya di Inhil Tembilahan, Propinsi Riau. 2022.

Salimi, M., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Climate change impacts on critical urban infrastructure and urban resiliency strategies for the Middle East. *Sustainable Cities and Society*, *54*, 101948.

Sallata, M. K. (2015). Konservasi Dan Pengelolaan Sumber Daya Air Berdasarkan Keberadaannya Sebagai Sumber Daya Alam. *Info Teknis EBONI*, *12*(1), 75–86.

Schulze, E. D., & Mooney, H. A. (1994). Ecosystem function of biodiversity: a summary. In *Biodiversity and ecosystem function* (pp. 497-510). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Scutt, J. A. (2024). Beyond The New Millennium—Forward to the Past, Back to the Future. In *Wage Rage for Equal Pay: Australia's Long,*

Long Struggle (pp. 433-462). Cham: Springer International Publishing.

Setiawan, B., Rahayu, S., & Prasetyo, L. B. (2021). Pengaruh pendidikan lingkungan terhadap kesadaran konservasi sumber daya air di kalangan siswa sekolah dasar. Jurnal Pendidikan Lingkungan dan Pembangunan, 15(1), 1-10.

Setiawan, B., Rahayu, S., & Prasetyo, L. B. (2021). Urbanization impacts on water quality of Ciliwung River in Jakarta, Indonesia. Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development, 11(2), 276-283. DOI: 10.2166/washdev.2020.204.

Shaaban, M., & Petinrin, J.O. (2014). Renewable energy potentials in Nigeria: meeting rural energy needs, Renew. Sustain. Energy Rev, 29, 72.

Shamir, Y. (2016). Alternative dispute resolution approaches and their application.

Shareefdeen, Z. (2022). Development and Validation of a Practical Model for Transient Biofilter Performance. *BioTech*, *11*(4), 51.

Sharma, B., Sharma, K., & Bhattarai, R. (2019). Water quality assessment of Bagmati River and its tributaries in Kathmandu Valley. Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development, 9(3), 572-579. DOI: 10.2166/washdev.2019.053.

Sharma, H. D., & Reddy, K. R. (2004). *Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies*. John Wiley & Sons.

Shen, J., Cheng, C., Cheng, X., & Lund, J. R. (2016). Coordinated operations of large-scale UHVDC hydropower and conventional hydro energies about regional power grid. *Energy*, *95*, 433–446. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.12.011

Shin, H. W., Lee, Y. K., & Kim, D. G. (2019). Public awareness and support for environmental conservation: A case study of the Mount Bukhan National Park in Korea. Sustainability, 11(20), 5731. DOI: 10.3390/su11205731.

Siagian, P., Suleman, N., Purba, J. S., Asrim, A., Tambi, T., Widiyanti, S. E., Prihatini, W. O. Z., Budirohmi, A., & Armus, R. (2023). *Energi Baru Terbarukan Sebagai Energi Alternatif*.

Sihotang, I. V., Sudarmadji, Purnama, I. L. S., & Baiquni, M. (2016). Model Konservasi Sumberdaya Air Sebagai Updaya Mempertahankan Keberlanjutan Air di Sub DAS AEK Silang. *SPATIAL Wahana Komunikasi Dan Informasi Geografi*, *15*(1), 1–11.

Singh, D.K., Raj, R., Tirkey, J.V., Jena, P., Parthasarathy, P., & Mckay, G. (2023). Progress and utilization of biomass gasification for decentralized energy generation: an outlook & critical review. Environmental Technology Reviews, 12, 1–36, https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2242014.

Siregar, L. H., Nasution, Z., & Fatimah. (2021). Pengelolaan Air Asam Tambang dari Batuan Sisa di Pit Barani dan Ramba Joring serta Aplikasi Model Enkapsulasi pada Bendungan Tailing di Tambang Emas Martabe. *Serambi Engineering*, *6*(3), 1970 – 1980.

Skuse, C., Gallego-Schmid, A., Azapagic, A., & Gorgojo, P. (2021). Can emerging membrane-based desalination technologies replace reverse osmosis?. *Desalination*, *500*, 114844.

Smith, J.N., Mongin, M., Thompson, A., Jonker, M.J., De'ath, G., & Fabricius, K.E. (2020). Shifts in coralline algae, macroalgae, and coral juveniles in the Great Barrier Reef associated with present-day ocean acidification. Glob Chang Biol, 26, 4, 2149–60. doi: 10.1111/gcb.14985.

Smyth, E., & Vanclay, F. (2017). The Social Framework for Projects: a conceptual but practical model to assist in assessing, planning and managing the social impacts of projects. *Impact Assessment and Project Appraisal*, *35*(1), 65-80.

Soedradjat, R. 1999. *Lingkungan Hidup, Suatu Pengantar*. Dikti, P & K. Jakarta.

Soerjadi, R. (2022). Dampak Emisi Gas Rumah Kaca dari Pembangkit Listrik Batubara terhadap Keberlanjutan Lingkungan. *Jurnal Energi Dan Keberlanjutan*, *1*(1), 1–10.

Sonika Phian [1], Shilpi Nagar [2], Jasleen Kaur [3], Charu Dogra Rawat, 2015. Health impact metrics for air pollution management strategies **Environment International.** Volume 85, December 2015, Pages 84-95

Srivastava, N. K., & Majumder, C. B. (2008). Novel biofiltration methods for the treatment of heavy metals from industrial wastewater. *Journal of hazardous materials*, *151*(1), 1-8.

Stefenon, S. F., Seman, L. O., da Silva, L. S. A., Mariani, V. C., & Coelho, L. dos S. (2024). Hypertuned temporal fusion transformer for multi-horizon time series forecasting of dam level in hydroelectric power plants. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *157*, 109876. https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2024.109876

Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., & Folke, C. (2015). Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. Science, 347,6223,1259855. doi: 10.1126/science.1259855.

Stem, C., Margoluis, R., Salafsky, N., & Brown, M. (2005). Monitoring and evaluation in conservation: a review of trends and approaches. *Conservation biology*, *19*(2), 295-309.

Subhan, M., Irfan, M., Pan, X., Ahmad, G., Naeem, M. H., & Zamir, M. N. (2024). Unveiling the dynamic impact of energy generation on economic sustainability in Canada: A roadmap towards sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, *434*, 139783. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.139783

Sugiyanto, G., Makbul, R., Purnomo, T., Arifien, Y., Susilawaty, A., Pramudianto, A., ... & Sunartaty, R. (2022). Analisa Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL). *PT. Global Eksekutif Teknologi*.

Sukino, W. G., Samad, M. A., Mangngasing, N., & Rivai, A. (2019). Manajemen Mitigasi Bencana Kota Palu Palu City Disaster Mitigation Management. *Journal of Public Administration and Government*, *1*(2), 1–8.

Sun, L., Yin, J., & Bilal, A. R. (2023). Green financing and wind power energy generation: Empirical insights from China. *Renewable Energy*, *206*, 820–827. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.02.018

Sunday, J.M., Fabricius, K.E., Kroeker, K.J., Anderson, K.M., Brown, N.E., Barry, J.P., Connell, S.D., Dupont, S., Gaylord, B., Hall-Spencer, J.M., Klinger, T., Milazzo, M., Munday, P.L., Russell, B.D., Sanford, E., Thiyagarajan, V., Vaughan, M.L.H., Widdicombe, S., & Harley, C.D.G. (2017). Ocean acidification can mediate biodiversity shifts by changing biogenic habitat. Nat Clim Chang, 7, 1, :81–5. doi: 10.1038/nclimate3161.

Suryadi, F., Sukartiko, W., & Yusuf, M. (2019). Pengelolaan sumber daya air untuk meningkatkan produktivitas pertanian di Indonesia. Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia, 24(2), 79-87.

Suryadi, M., & Kusuma, G. J. (2019). Pengelolaan Air Asam Tambang (AAT) Dari Dinding Bekas Penambangan Sebagai Alternatif Penanggulangan Pencemaran Lingkungan: Studi Kasus Tambang Batu Hijau, Nusa Tenggara Barat. *Jurnal Sosioteknologi*, *18*(3), 433 – 448.

Tacconi, L., Obidzinski, K., & Agung, F. (2019). Forest governance and the environment: A political economy analysis of legality verification and its effects in the forestry sector in Indonesia. Land Use Policy, 81, 332-340. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.11.041.

Takacs, A. (2023). The positive effects of green technology investments on growth expectations. *Technology in Society*, *75*. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102407

Talukder, B., Ganguli, N., Matthew, R., VanLoon, G.W., Hipel, K.W., & Orbinski, J. (2022). Climate change-accelerated ocean biodiversity loss & associated planetary health impacts. The Journal of Climate Change and Health, 6, 100114.

Tchankova, L. (2002). Risk identification–basic stage in risk management. *Environmental management and health*, *13*(3), 290-297.

Theodore, L., & Dupont, R. R. (2019). *Water resource management issues: Basic principles and applications*. CRC Press.

Thomas, C.D., Cameron, A., Green, R.E., Bakkenes, M., Beaumont, L.J., Collingham, Y.C., & Hughes, L. (2004). Extinction risk from climate change. Nature, 427, 145–8. doi: 10.1038/nature02121.

Tideman, J., Keuning, E. (2024). Bioaugmentation. https://bioclearearth.com/techniques/bioaugmentation.

Tom, I. N., Adnyano, A. A. I. A., & Sumarjono, E. (2020). Kajian Teknis Pencegahan Dan Penanganan Air Asam Tambang Pada Penambangan Batubara PT Kayan Putra Utama Coal – Site Separi. *Mining Insight*, *1*(2), 203–210.

Tomislav, K. (2018). The concept of sustainable development: From its beginning to the contemporary issues. *Zagreb International Review of Economics & Business*, *21*(1), 67-94.

Treves, A., Chapron, G., López-Bao, J. V., Shoemaker, C., Goeckner, A. R., & Bruskotter, J. T. (2017). Predators and the public trust. *Biological Reviews*, *92*(1), 248-270.

Triadi, R. A. (2019). *Konstruksi Berkelanjutan:Sebuah Pengantar*.

Tufail, M. A., Iltaf, J., Zaheer, T., Tariq, L., Amir, M. B., Fatima, R., ... & Ayyub, M. (2022). Recent advances in bioremediation of heavy metals and persistent organic pollutants: A review. *Science of The Total Environment*, *850*, 157961.

Uddin, K. M. K., Rahman, M. M., & Saha, S. (2023). The impact of green tax and energy efficiency on sustainability: Evidence from Bangladesh. *Energy Reports*, *10*, 2306–2318. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.09.050

Ullo, S. L., & Sinha, G. R. (2020). Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors. *Sensors*, *20*(11), 3113.

Ulum, M. C., & Ngindana, R. (2017). *Environmental Governance: Isu Kebijakan dan Tata Kelola Lingkungan Hidup*. Universitas Brawijaya Press.

Usman, M., & Radulescu, M. (2022). Examining the role of nuclear and renewable energy in reducing carbon footprint: does the role of technological innovation really create some difference?. *Science of The Total Environment*, *841*, 156662.

Uthicke, S., Pecorino, D., Albright, R., Negri, A.P., Cantin, N., Liddy, M., Dworjanyn, S., Kamya, P., Byrne, M., & Lamare, M. (2013). Impacts of ocean acidification on early life-history stages and settlement of the coral-eating sea star acanthaster planci. PLoS ONE, 8, 12, e82938. doi: 10.1371/journal.pone.0082938.

Valipour, A., Raman, V. K., & Ahn, Y. H. (2015). Effectiveness of domestic wastewater treatment using a bio-hedge water hyacinth wetland system. *Water*, *7*(1), 329-347.

Valles-Regino, R., Tate, R., Kelaher, B., Savins, D., Dowell, A., & Benkendorff, K. (2015). Ocean warming and CO2-induced acidification impact the lipid content of a marine predatory gastropod. Mar Drugs, 13, 10, 6019–37. doi: 10.3390/md13106019.

Van de Poel, I., & Royakkers, L. (2023). *Ethics, technology, and engineering: An introduction*. John Wiley & Sons.

Vanya, K. (2021). *Mengenal Teknologi Hijau*. https://www.kompas.com/skola/read/2021/11/01/170000769/mengenal-teknologi-hijau

Vento, E., Hartikainen, A., Tikka, A., Lamberg, H., Sippula, O., & Kilpeläinen, A. (2024). Integrating aerosol emissions of forest biomass into a life cycle assessment of forest-based production. *Biomass and Bioenergy*, *183*, 107156. https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2024.107156

Vo, H. T., Vrachioli, M., Frick, F., Sauer, J., Brucet Balmana, S., Benejam Vidal, L., Mehner, T., Lemmens, P., Oertli, B., Boissezon, A., Beklioğlu, M., Dolcerocca, A., & Meerhoff, M. (2023). Socio-economic or environmental benefits from pondscapes? Deriving stakeholder preferences using analytic hierarchy process and compositional data analysis. *Journal of Environmental Management*, *342*, 118298. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.118298

Vos, P., Meelis, E., & Ter Keurs, W. J. (2000). A framework for the design of ecological monitoring programs as a tool for environmental and nature management. *Environmental monitoring and assessment*, *61*, 317-344.

Wahyudi, M., Azikin, R., & Rahim, S. (2019). Manajemen Penanggulangan Banjir Di Kelurahan Paccerakkang Kota Makassar. *Kolaborasi : Jurnal Administrasi Publik*, *5*(1), 31–45.

Wang, H., Xiong, B., Zhang, Z., Zhang, H., & Azam, A. (2023). Small wind turbines and their potential for internet of things applications. *Iscience*, *26*(9).

Wang, J., Delavar, M.A. (2024). Modelling phytoremediation: Concepts, methods, challenges and perspectives. Soil & Environmental Health. 2(1), 100062 https://doi.org/10.1016/j.seh.2024.100062.

Watson, K., Klingenberg, B., Polito, T., & Geurts, T. G. (2004). Impact of environmental management system implementation on financial performance: A comparison of two corporate strategies. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, *15*(6), 622-628.

Weiner, R., & Matthews, R. (2003). *Environmental engineering*. Butterworth-Heinemann.

WHO. (2015). Operational framework for building climate resilient health systems. World Health Organization. Available at https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/189951/9789241565073_eng.pdf.

Widiastuti, E., Arifianti, L., & Susilo, B. (2020). Impacts of agricultural land use on water quality in Citarum River, Indonesia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 425(1), 012026. DOI: 10.1088/1755-1315/425/1/012026.

Winton, M. (2003). On the climatic impact of ocean circulation. J Clim, 16, 17, 2875–89. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016≤2875:OTCIOO≥2.0.CO;2.

World Bank. (2023). *Environmental and Social Impacts of Renewable Energy*. https://www.worldbank.org/en/home

Wu, J., Guo, S., Huang, H., Liu, W., & Xiang, Y. (2018). Information and communications technologies for sustainable development goals: state-of-the-art, needs and perspectives. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *20*(3), 2389-2406.

WWF. (2023). *Renewable Energy and the Environment*. https://www.worldwildlife.org/

Xie, H., Wang, P., & Huang, H. (2013). Ecological risk assessment of land use change in the Poyang Lake eco-economic zone, China. *International journal of environmental research and public health*, *10*(1), 328-346.

Yakin, S. K. (2017). Analisis mengenai dampak lingkungan (AMDAL) sebagai instrumen pencegahan pencemaran dan perusakan lingkungan. *Badamai Law Journal*, *2*(1), 113-132.

Yan, X., Ying, Y., Li, K., Zhang, Q., & Wang, K. (2024). A review of mitigation technologies and management strategies for greenhouse gas and air pollutant emissions in livestock production. *Journal of Environmental Management*, *352*, 120028. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.120028

Yang, H., Lohmann, G., Lu, J., Gowan, E.J., Shi, X., Liu, J., & Wang, Q. (2020). Tropical expansion driven by poleward advancing midlatitude meridional temperature gradients. J Geophys Res Atmos, 125, 16. Doi: e2020JD033158. doi: 10.1029/2020JD033158.

Yang, W., Xiao, C., & Liang, X. (2024). Assessment of regional-scale geothermal production based on a hybrid deep learning model: A case study of the southern Songliao Basin, China. *Renewable Energy*, *223*, 120062. https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2024.120062

Yeruham, E., Shpigel, M., Abelson, A., & Rilov, G. (2020). Ocean warming and tropical invaders erode the performance of a key herbivore. Ecology, 101, 2. doi:e02925. doi: 10.1002/ecy.2925.

Yousefi, H., Noorollahi, Y., & Peirow, S. (2015). Status of environmental impact assessment. *Envtl. Pol'y & L.*, *45*, 320.

Yusmur, A., Ardiansyah, M., & Mansur, I. (2019). Mitigasi Dan Arahan Pengelolaan Air Asam Tambang Melalui Hutan Rawa Buatan Di Lahan Pasca Tambang. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, *9*(3), 566–576

Zele, S., Joshi, A., Gogate, N., Marathe, D., & Shitole, A. (2024). Experimental investigation on utilization of crushed solar panel waste as sand replacement in concrete. *Solar Energy*, *269*, 112338. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2024.112338

Zhou, Y., Wang, Y., & Yang, M. (2024). Optimal integration of renewable energy in refinery hydrogen management systems: Energy storage and direct utilization. *Energy Conversion and Management*, *304*, 118223. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2024.118223

Zhu, Q., & Jesiek, B. K. (2017). A pragmatic approach to ethical decision-making in engineering practice: Characteristics, evaluation criteria, and implications for instruction and assessment. *Science and engineering ethics*, *23*(3), 663-679.

Zouboulis, P.A. Moussas, 2011. Groundwater and Soil Pollution: Bioremediation. Encyclopedia of Environmental Health 2011, Pages 1037-1044

BIODATA PENULIS

Dr. Ranno Marlany Rachman, ST., M.Kes. Lahir di Wua-Wua, Pada Tanggal 9 Desember 1980. Menyelesaikan S1 Jurusan Teknik Lingkungan Di Institut Teknologi Yogyakarta, Tahun 2003, S2 Jurusan Kesehatan Lingkungan Universitas Diponegoro Semarang Tahun 2008 dan S3 Jurusan Teknik Lingkungan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Tahun 2018. Aktivitas Saat ini adalah sebagai dosen tetap Program Studi Rekayasa Infrastruktur Lingkungan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo (UHO), Kendari Sulawesi Tenggara. Penulis telah menghasilkan 1 Buku Referensi dan 20 buku chapter antara lain yaitu Buku Remediasi Timbunan Tailing Berbasis Teknologi Stabilisasi/Solidifikasi, Buku Ekotoksikologi (Pencemaran, Restorasi dan Masa Depan), Buku Pencemaran Air, Buku Mitigasi Bencana, Buku Polusi dan Lingkungan, Buku Merayakan kemerdekaan (Refleksi Dosen dalam Membangun Generasi Penerus Bangsa), Buku Pembangunan Infrastruktur Indonesia, Buku Revolusi Palstik dan Lingkungan, Buku Krisis Iklim Global Di Indonesia (Dampak dan Tantangan), Buku Beton Pracetak (Teknologi, Produksi dan Aplikasi), Buku Sosial Ekonomi Pertanian, Buku Kesuburan Tanah dan sebagainya.

Badrun Ahmad S.T., M.T. lahir di Takofi Moti 27 Desember 1990. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana teknik dari Institut Teknologi Nasional Bandung, pada tahun 2013. Penulis melanjutkan studi magister teknik lingkungan di Institut Teknologi Bandung (ITB) dan lulus pada tahun 2019. Saat ini penulis bekerja sebagai dosen tetap PNS di Kemdikbudristek satuan kerja Universitas Khairun Ternate. Penulis aktif mengikuti seminar, aktif mempublikasi artikel pada jurnal nasional dan internasional bereputasi. Penulis juga aktif sebagai dewan editor jurnal dan reviewer pada jurnal nasional. Penulis aktif menulis seperti buku : Pengembangan Sumber Daya Air, Mikroplastik pada lingkungan perairan dan aktif menulis makalah ilmiah.

Miska Sanda Lembang, S.Si., M.Si lahir di Balikpapan pada tanggal 17 April 1992. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Kimia, Fakultas Matematikan dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin (UNHAS) tahun 2014. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Ilmu Kimia, Sekolah Pascasarjana Universitas Indonesia tahun 2018 melalui program Beasiswa Unggulan (BU). Penulis bekerja sebagai dosen PNS di Program Studi Akuakultur, FPIK Universitas Borneo Tarakan tahun 2019-sekarang. Penulis aktif mengikuti seminar, mempublikasi artikel pada jurnal nasional dan internasional bereputasi; aktif sebagai editor jurnal dan reviewer pada jurnal nasional terakreditas; aktif sebagai penulis, seperti buku : Kualitas Air Akuakultur dan Usaha Budidaya Perikanan dengan Teknologi *Recirculating Aquaculture System*. Selain itu penulis juga aktif menjadi dosen pembimbing lapangan pada MBKM Kampus Mengajar Angkatan 5 dan Angkatan 7.

Dr. Benny Hidayat, SP, MP. lahir di Medan Sumatera Utara, tanggal 5 Juni 1976 hingga sekarang menetap di kota Medan Sumatera Utara. Menyesaikan pendidikan Sarjana pada tahun 1999 di Universitas Sumatera Utara (USU) pada minat Ilmu Tanah, kemudian tahun 2002 melanjutkan pendidikan S2 di USU research kerjasama dengan BPTP Sumatra Utara pada penelitian rekomendasi pemupukan spesifik lokasi pada padi Sawah serta S3 di USU kerjasama penelitian dengan McGill University Canada pada penelitian Biochar, belajar biochar langsung dengan Prof. Joann Whalen dan Julia Major di Mc Gill University Canada. Penulis aktif pada survey tanah dan Evaluasi lahan pada tahun 2011-2015 bersama Dr. Rahmad Adiwiganda. Saat ini penulis aktif sebagai dosen tetap di Program studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara sejak tahun 2010 hingga sekarang. Buku yg pernah ditulis bersama Dr. Mukhlis dan Prof. T. Sabrina berjudul "Biochar Sebagai Amandemen Potensial" di terbitan oleh USU Press. Penulis juga reviewer di Science Alert dan chief editor Jurnal Pertanian tropik sinta 4 serta jurnal nasional Agroteknologi Fakuktas Pertanian USU. Penulis juga aktif sebagai pembicara dan penulis di jurnal Nasional dan International.

Nur Ikhsan, S.Pi., M.Si lahir di Bau-Bau, 21 April 1990. Penulis menempuh program SI program studi Manajemen Sumberdaya Perairan (MSP) di Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan (FPIK), Universitas Halu Oleo (UHO) Kendari sejak 2008 dan lulus 4 tahun berikutnya. Karir pertama dimulai di tahun 2012-2013 dengan menjadi staf administrasi dan asisten dosen mata kuliah Avertebrata Air dan Olahraga Air di FPIK UHO. Pada tahun 2013 akhir Penulis melanjutkan studi S2 di Institut Pertanian Bogor (IPB) pada program studi Ilmu Kelautan (IKL) pada tahun 2013 dan lulus 2 tahun berikutnya. Penulis kembali ke FPIK UHO untuk menjadi Dosen Tetap di FPIK UHO Jurusan Ilmu Kelautan pada tahun 2016-2017. Selanjutnya pada tahun 2017-sekarang menjadi Dosen Tetap di Akademi Komunitas Kelautan dan Perikanan (AKKP) Wakatobi. Selama mengabdi di AKKP penulis pernah mendapat kepercayaan menjadi Ketua Program Studi Ekowisata Bahari, Kepala Unit Sertifikasi, Kepala Unit Kerohanian, Kepala Pusat Pembinaan Karakter, Kepala Laboratorium Ekologi Pesisir dan Laut, dan Kepala Laboratorium Selam, dan Kepala Unit Penelitian.

Abdul Rahim Sya'ban, SKM., M.Sc. Penulis lahir di Kabupaten Muna, Provinsi Sulawesi Tenggara. Ketertarikan menulis sejak duduk di bangku SMA Negeri 2 Raha dengan menulis puisi dan cerpen singkat. Ketertarikan menulis ternyata membuka ruang ilmiah yang cukup luas setelah menamatkan pendidikan tinggi saya tergabung dengan komunitas Duta Bahasa Nasional dengan menulis berbagai jenis tulisan kolaborasi secara nasional. Menempuh pendidikan lanjut ke pascasarjana di bidang Kesehatan dan Keselamatan Kerja di Universitas Gadjah Mada membuat saya banyak menulis untuk kebutuhan tesis dalam beragam jurnal dan proceeding untuk simposium di tahun 2012. Tahun 2021 saya melanjutkan studi pada S3 Teknologi Lingkungan dan Kebumian Universitas Hasanuddin Makassar dan melengkapi keseriusan saya untuk lebih matang dalam menulis karya ilmiah. Selain aktif di dunia akademik saya juga ikut dalam berorganisasi yang membantu wawasan dalam keahlian diantaranya PERSAKMI, IAKMI, GRANAT Provinsi

Sulawesi Tenggara sehingga saya sangat membantu wawasan saya dalam menulis. Hal ini sangat membantu saya dalam bidang kepakaran di bidang keselamatan dan kesehatan kerja lingkungan Industri dan Pertambangan. Email : abdul.enviro99@gmail.com

Katarina Hesty Rombe, M.Si lahir di Ujung pandang (sulawesi selatan) pada tanggal 25 Juni 1992. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, Universitas Hasanuddin (Unhas) tahun 2014. Penulis menyelesaikan pendidikan magister pada Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Lautan, Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor tahun 2017. Penulis bekerja sebagai Dosen Tetap Non PNS (DTNP) pada Akademi Komunitas Kelautan dan Perikanan Wakatobi dari tahun 2017-2019. Tahun 2019-sekarang penulis menjadi Dosen (PNS) pada salah satu perguruan tinggi di bawah naungan Kementerian Kelautan dan Perikanan, yaitu Politeknik Kelautan dan Perikanan Bone, Program Studi Teknik Kelautan.

Penulis aktif mempublikasi artikel ilmiah baik di jurnal internasional bereputasi dan nasional seperti: *Biodiversitas Journal of Biological Diversity* 24(2):1049-1056 (Q3) dengan judul "*Application of remote sensing and GIS for mapping changes in land area and mangrove density in the Kuri Caddi Mangrove tourism, South Sulawesi Province, Indonesia*"; *Biodiversitas Journal of Biological Diversity* 23(4):2130-2136 (Q3) dengan judul "*Analysis of Heavy Metals (Pb and Cd) in Seagrasses Thalassia hemprichii and Enhalus acoroides from Pulau Sembilan, South Sulawesi Province, Indonesia*"; *Jurnal Kelautan Tropis 25(2):169-178 (SINTA 2) dengan judul "Pemetaan Sebaran Lamun Menggunakan Metode Lyzenga Studi Kasus Pulau Kapoposang, Provinsi Sulawesi Selatan";* jurnal *Kelautan Trunojoyo 15(3):216-225 (SINTA 3) dengan judul "Monitoring Hiu Paus (Rhyncodon typus) di Perairan Pantai Botubarani Kecamatan Kabila Bone Kabupaten Bone Bolango Provinsi Gorontalo"; jurnal Airaha 9(2):164-170 (SINTA 3) dengan judul "Pola Sebaran dan Keanekaragaman Jenis Lamun di Perairan Tanjung Pallette dan Tangkulara, Kabupaten Bone, Provinsi Sulawesi Selatan".*

La Ode Muhammad Rauda Agus Udaya Manarfa lahir di Gelora (Jakarta Pusat) pada tanggal 18 November 1984. Menempuh pendidikan sarjana pada Program Studi Sosiologi, Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik, Universitas Dayanu Ikhsanuddin (UNIDAYAN) tahun 2008. Menyelesaikan pendidikan Magister pada Program Studi Ilmu Administrasi Negara, Program Pascasarjana, Universitas Dayanu Ikhsanuddin (UNIDAYAN) tahun 2012. Mengenyam pendidikan Doktor pada Program Studi Sosiologi Pedesaan Fakultas Ekologi Manusia Sekolah Pasca Sarjana Institut Pertanian Bogor (IPB) tahun 2013 - 2020. Penulis bekerja sebagai Dosen pada Program Studi Sosiologi Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik Universitas Dayanu Ikhsanuddin (UNIDAYAN) Baubau. Email laodemraudaaumanarfa@unidayan.ac.id dan rauda.ode@gmail.com

Telah menghasilkan karya ilmiah dalam bentuk artikel maupun buku, antara lain: [1] Artike berjudul *Pemikiran Soekarno Tentang Pemuda dan Perubahan Sosial* (2010), dipublikasikan pada Jurnal Akademika UNIDAYAN, Volume 7, Edisi September 2010; [2] Artikel berjudul *Strategi Nafkah Dan Pola Pengambilan Keputusan Rumah Tangga Pengrajin Gula Kelapa Studi Di Desa Ujung Genteng Kecamatan Ciracap Kabupaten Sukabumi Jawa Barat* (2015), dipublikasikan pada Sodality Jurnal Sosiologi Pedesaan, Volume 3, Edisi 3; [3]. Artikel berjudul *The Order of the City Three Fortresses Adjacent to the Sultanate of Buton in the Local Culture-Based Hilly Landscape of Baubau City of Southeast Sulawesi* (2023), dipublikasikan pada Jurnal GMPI Conference Series, Volume 2, Edisi Januari 2023; [4] Artikel berjudul *Teori Diskursus dan Konseptualisasi Diskursus Lingkungan* (2023), dipublikasikan pada Jurnal Noken: Ilmu-Ilmu Sosial, Volume 8, Edisi Juni 2023; [5] Artikel berjudul *Analisis Perbandingan Total Fertility Rate (TFR) Indonesia dari Masa ke Masa (Periode 1971 – 2012)* (2023), dipublikasikan pada Jurnal Sosiologi Miabhari, Volume 1, Edisi 1; [6] Buku berjudul *Komunikasi Sosial Pembangunan Terpadu* (2023), dipublikasikan oleh Tohar Media; [7] Buku berjudul *Teori Sosiologi* (2024), dipublikasikan oleh Eureka; [8] Buku berjudul *Perekonomian Indonesia Dalam Konteks Multisektor* (2024), dipublikasikan oleh Kamika Jaya Aquatic.

Rini Sriyani, ST., MT, Menyelesaikan S1 Jurusan Teknik Sipil di Universitas Muslim Indonesia Makassar Tahun 1995, S2 Jurusan Teknik Sipil di Universitas Hasanuddin Makassar Tahun 2008. Aktifitas saat ini adalah Sebagai Dosen Tetap pada Program Studi Rekayasa Infrastruktur Lingkungan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo (UHO), Kendari Sulawesi Tenggara. Aktif Sebagai Pengurus Persatuan Insinyur Indonesia (PII) Cabang Kota Kendari dan Aktif Sebagai Pengurus Masyarakat Transportasi Indonesia (MTI) Cabang SULTRA serta Aktif Sebagai Asesor P3SM.

Asrim, S.Si., M.Eng lahir di Buton (Pulau Kadatua), Sulawesi Tenggara pada 12 Juli 1985, anak dari pasangan Abdul Kadir (Ayah) dan Wa Ode Sarufa (Ibu). Penulis merupakan lulusan dari program Diploma III Geofisika Universitas Padjadjaran tahun 2006, S1 Fisika (Peminatan Geofisika) Universitas Indonesia tahun 2010 dan Magister Teknik Geologi (Peminatan *Petroleum Geoscience*) Universitas Gadjah Mada tahun 2013. Pada Desember 2006 bekerja di VICO Indonesia, salah satu perusahaan minyak dan gas swasta asing di Jakarta, Indonesia. Pada pertengahan tahun 2010 bergabung dengan VICO CBM Indonesia yang berkonsentrasi pada pengembangan gas metana batubara di Indonesia.

Pada awal tahun 2018 sampai dengan saat ini bekerja sebagai Dosen Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Dayanu Ikhsanuddin (Unidayan) di Kota Baubau, Sulawesi Tenggara. Selama bekerja di Unidayan sudah menghasilkan beberapa karya ilmiah yang berkaitan dengan disiplin ilmu geologi, geofisika, dan pertambangan. Selain menjadi dosen, penulis juga mendapat tugas tambahan sebagai Kepala Bagian Akreditasi dan Sertifikasi Lembaga Penjaminan Mutu (LPM) Unidayan pada tahun 2018-2021, kemudian sebagai Kepala Pusat SPMI dan SPME Lembaga Pengembangan Pendidikan, Penjaminan Mutu dan Layanan Karir (LP3MLK) Unidayan pada tahun 2021-2023 dan sebagai sekretaris LP3MLK Unidayan tahun 2023 – sekarang.

MANAJEMEN REKAYASA LINGKUNGAN

Buku "Manajemen Rekayasa Lingkungan" menggali secara komprehensif berbagai aspek yang menjadi fondasi penting dalam menjaga keberlanjutan lingkungan. Dengan fokus pada konsep dasar, teknologi, dan inovasi, pembaca diajak untuk memahami esensi dari disiplin ini. Melalui pembahasan tentang toksikologi lingkungan perairan, manajemen polusi udara, dan pencemaran tanah, buku ini menyoroti tantangan nyata yang dihadapi dalam menjaga kualitas lingkungan. Konsep manajemen konservasi sumber daya alam menjadi kunci dalam memastikan kelangsungan ekosistem dan keanekaragaman hayati.

Dalam konteks mitigasi bencana alam, pembaca diperkenalkan pada strategi rekayasa yang dapat mengurangi risiko dan merespons secara efektif terhadap bencana alam yang sering kali mengancam lingkungan. Buku ini juga mengulas peran kritis rekayasa lingkungan dalam menanggapi tantangan global perubahan iklim, serta penerapan energi terbarukan sebagai solusi untuk mengurangi jejak karbon. Namun, di balik semua teknologi dan strategi, aspek etika dan sosial tidak boleh dilupakan. Buku ini menekankan pentingnya mempertimbangkan implikasi moral dan sosial dari setiap tindakan dalam rekayasa lingkungan.

Dengan menyajikan berbagai studi kasus yang menarik dan relevan, pembaca diberikan pemahaman yang mendalam tentang penerapan konsep dan strategi manajemen rekayasa lingkungan dalam situasi dunia nyata. Diharapkan bahwa buku ini tidak hanya menjadi sumber pengetahuan, tetapi juga menjadi panduan praktis bagi pembaca untuk terlibat dalam upaya menjaga keberlanjutan lingkungan.

Penerbit KAMIYA JAYA AQUATIC
Kelurahan Fitu, Kecamatan Ternate Selatan, Kota Ternate,
Maluku Utara
Telp. : 0812-2279-3284
Email : kamiyajayaaquatic@gmail.com
Website : https://kjaquatic.com/

ISBN 978-623-10-0778-0 (PDF)